

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Modelování vířivých proudů v přípojnicích pomocí numerického modelu
FEM Computing of Eddy Currents Inside of Bus-Bar

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Antonín Hub

Poděkování

Tímto bych zároveň chtěl poděkovat Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za užitečné rady a odbornou pomoc při vypracování Bakalářské práce.

Děkuji

Abstrakt

V mé bakalářské práci se zabývám problematikou rozložení hustoty proudu, střídavého proudu ve vodiči, obdélníkového i kruhového průřezu. Velikostmi ztrát, které jsou způsobené průchodem jak střídavého tak i stejnosměrného proudu vodičem daného průřezu. Dále jak se vzájemně ovlivňují dva vodiče obdélníkových i kruhových průřezů. K analýze je použit simulační program pro výpočet pomocí metody konečných prvků. Vypočtené hodnoty jsou porovnány s příklady, které jsem našel v literaturách a následně vyhodnoceny rozdíly.

Klíčová slova

Hloubka vniku, povrchový jev, proudová hustota, magnetické pole, indukce, permeabilita, frekvence, přídavné ztráty, vodič, jev blízkosti, proudové vlákno, rozložení proudu, elektromagnetické pole, elektromagnetická indukce, ztráty způsobené průchodem střídavého proudu vodičem, elektromagnetická intenzita, metoda konečných prvků, analýza, ztráty způsobené průchodem stejnosměrného proudu vodičem, přípojnice přípojnícové systémy, elektrický odpor, Joulovy ztráty, činitel povrchového jevu, obdélníkový vodič, činitel přídavných ztrát, činitel jevu blízkosti, simulace, modelování, ztráty, vzájemná vzdálenost.

Abstract

In my thesis I focused on the distribution of current density and alternating current in the conductors of the rectangular and circular profile. Also I focused on the magnitude of the losses which were caused by the passage of both AC and DC current through the given conductor profile. Further I targeted on the interaction between two conductors of rectangular and circular profile. For the analysis I used a simulation program based on the finite element method. The calculated values were compared with the examples that I found in the literature and subsequently evaluated.

Key Words

Depth of penetration, skin effect, current density, magnetic field induction, permeability, frequency, additional losses, conductor, proximity effect, current thread, current distribution, electromagnetic field, electromagnetic induction, alternating current loss, the electromagnetic intensity, finite element method, analysis, direct current loss, busbar, busbar systems, electrical resistance, Joule heating, skin effect factor, rectangular conductor, additional loss factor, proximity effect factor, simulation, modeling, losses, mutual distance.

OBSAH

1. Seznam Použitých Značek	6
2. Základní Popisky Problematiky	7
2.1. Povrchový Jev - Skin Efekt	7
2.1.1. Odvození Pro Vytvoření Povrchového Jevu	7
2.2. Jev Blízkosti, Vzájemné Ovlivnění	12
2.3. Přesné Rozložení Střídavého Proudů Ve Vodiči	14
2.3.1. Odvození Pro Rozložení Střídavého Proudů Ve Vodiči	14
2.4. Popis Použitého Modelovacího Softwaru	15
2.5. Přípojnice A Přípojnícové Systémy	16
2.5.1. Výrobci Přípojníc A Přípojnícových Systémů	17
2.5.2. Katalogy Přípojníc A Přípojnícových Systémů	17
2.6. Výpočet Odporu	19
2.6.1. Jouleovy Ztráty	19
2.6.2. Elektrický Odpor	19
3. Srovnání Již Vypočtených Příkladů Se Simulovanými Případy	20
3.1. Simulace Samostatného Kruhového Vodiče	20
3.1.1. Tabulka Hodnot Nasimulovaného Kruhového Vodiče	20
3.1.2. Popis Případu	20
3.1.3. Průběhy Pro Kruhový Vodič	20
3.1.4. Náhled Rozložení Proudové Hustoty Ve Vodiči	22
3.1.5. Srovnání S Příkladem Výpočtu Povrchového Jevu U Kruhového Vodiče	22
3.1.5.1. Popis Případu Z Předchozího Příkladu:	22
3.1.5.2. Dle Analytického Výpočtu Z Předchozího Příkladu:	22
3.1.5.3. Vypočtené Hodnoty Pomocí Programu Ansys :	22
3.1.5.4. Náhled Rozložení Proudové Hustoty Ve Vodiči	23
3.2. Obdélníkový Vodič	24
3.2.1. Samostatný Obdélníkový Vodič	24
3.2.1.1. Tabulka Hodnot Nasimulovaného Obdélníkového Vodiče	24
3.2.1.2. Popis Případu	24
3.2.1.3. Průběhy Pro Obdélníkový Vodič	24
3.2.2. Náhled Rozložení Proudové Hustoty Ve Vodiči	26
3.2.3. Samostatný Obdélníkový Vodič Při Změně Stran Vodiče V Poměru (H:B) 2:1	27
3.2.3.1. Tabulka Hodnot Nasimulovaného Obdélníkového Vodiče	27
3.2.3.2. Popis Případu	27
3.2.3.3. Průběhy Pro Obdélníkový Vodič	28
3.3. Dva Obdélníkové Vodiče	29
3.3.1. Popis Simulovaného Případu Pro Dva Obdélníkové Vodiče	29
3.3.2. Tabulky Nasimulovaných Hodnot	29
3.3.3. Průběhy	30
3.4. Dva Kruhové Vodiče	33
4. Popis Řešení Metodou Konečných Prvků – Software Ansys	34
5. Závěr	35
6. Seznam Použité Literatury	37

ÚVOD

Pro vypracování mé bakalářské práce jsem si zvolil téma Modelování vířivých proudů v přípojnících pomocí numerického modelu. A to zejména proto, abych mohl hlouběji proniknout do této problematiky a přiblížit jej čtenářům mé práce a jenž by o zmíněnou problematiku měli zájem.

Cílem mé bakalářské práce bude problematika modelování vířivých proudů v přípojnících a vodičích. Dále se budu zabývat probíhajícími ději ve vodičích a přípojnících, když jimi protéká elektrický proud, jaká je jejich vzájemná interakce, mechanické namáhání při průchodu proudu, rozložení proudové hustoty, jak na sebe působí dvě přípojnice nebo dva vodiče v závislosti na jejich průřezu, jejich vzdálenosti, tvaru nebo velikosti proudu který v danou chvíli protéká danými přípojnícemi nebo vodiči.

Modelování a simulace bude realizována v programu ANSYS, jenž je založen na metodě konečných prvků. Ve výše zmíněném programu budu modelovat rozložení proudových hustot v daných vodičích nebo přípojnících, jejich vzájemné působení, vzájemné ovlivňování, závislosti na jejich tvaru, vzdálenostech a průřezu, jenž mezi sebou mají. To vše metodu konečných prvků. Simulovaný případ bude ve většině případů navržen podle předlohy. Za pomoci softwaru budou vypočteny požadované vlastnosti a přehledně zapsány do tabulek. Z tabulek budou vyneseny závislosti, do patřičných grafů. Vypočtené a vykreslené hodnoty budou porovnány se vzorovým případem z literatury, podle něhož byl modelován.

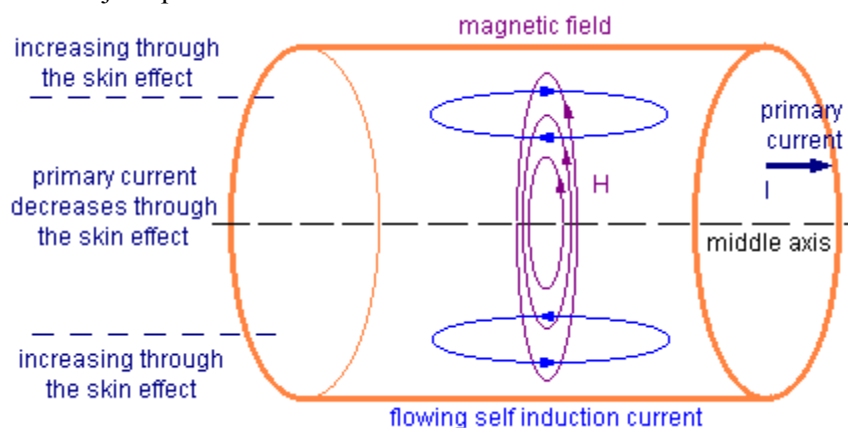
1. Seznam použitých značek

Značka	Popis značky	Jednotka
A	vektorový potenciál	
B	magnetická indukce	[T]
c	objemová tepelná kapacita	[J/m ³ .K]
d	průměr	[m]
E	elektrické pole	[V/m]
f	frekvence	[Hz]
g	gravitační zrychlení	[m/s ²]
H	magnetické pole	[A/m]
I	elektrický proud	[A]
J	proudová hustota	[A/m ²]
k _b	činitel jevu blízkosti	[-]
k _d	činitel přídavných ztrát	[-]
k _p	činitel povrchového jevu - skin-efekt	[-]
L	indukčnost	[H]
ℓ	délka	[m]
P	ztráty el. Výkonu	[W]
P _{SS}	ztráty el. Výkonu pro stejnosměrný proud	[W]
P _{ST}	ztráty el. Výkonu pro střídavý proud	[W]
R	elektrický odpor	[Ω]
r	poloměr	[m]
rot	rotace	
R _{SS}	elektrický odpor pro stejnosměrný proud	[Ω]
R _{ST}	elektrický odpor pro střídavý proud	[Ω]
S	plocha	[m ²]
t	čas	[s]
t _{RF}	referenční teplota	[K]
V	objem	[m ³]
α ₀	součinitel přestupu tepla do okolí	[W/m ² .K]
α _{RF}	součinitel teplotního odporu	[K ⁻¹]
γ	hloubka vniku	[m]
Δ	přírůstek, změna rozdíl	
ϑ	teplota	[K]
M	bod o souřadnicích (xM ; yM; zM)	[m]
N	bod o souřadnicích [xN ; yN; zN]	[m]
j	imaginární jednotka	
Π	Ludolfovo číslo (pi)	[-]
ρ	rezistivita (specifický odpor)	[Ω.m]
Φ	magnetický tok	[Wb]
Ω	elektrický odpor	[Ω]
J	proudová hustota	[A/m ²]

2. Základní popisky problematiky

2.1. Povrchový jev - Skin Efekt

Povrchový jev nebo-li „Skin Efekt“ vzniká při průchodu střídavého proudu vodičem většího průřezu. Při průchodu střídavého proudu vodičem vzniká kolem vodiče magnetické pole, část tohoto pole se indukuje zpětně do vodiče a vytváří v něm vířivé pole a to v blízkosti u středu vodiče. Vířivé proudy, které se naindukují v blízkosti u středu vodiče a mají opačný potenciál než naindukované pole v okolí vodiče způsobené průchodem proudu, to má za následek, vytlačení proudové hustoty po průřezu vodiče směrem k jeho povrchu viz obr. 2.1.



Obr. 2.1. Skin efekt – rozložení magnetického pole ve vodiči protéká-li jím proud [6]

2.1.1. Odvození pro vytvoření povrchového jevu

Bližší demonstrace na vodiči o kruhovém průřezu. Ze zákona o průtoku (pro okamžité hodnoty)

$$\oint H \cdot d\ell_1 = \int J \cdot dS_1 \quad (1)$$

za integrační dráhu ℓ_1 zvolíme poloměr r

$$2\pi r H = \int_0^r J 2\pi r \cdot dr \Rightarrow H = \frac{1}{r} \int_0^r J r \cdot dr \quad (2)$$

od tohoto magnetického pole si indukuje na dráze ℓ_2 napětí pro, které platí:

$$\oint E \cdot d\ell_2 = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

a dosadíme za:

$$E = \rho J \quad (4)$$

$$\Phi = \int B \cdot dS_2 \quad (5)$$

$$B = \mu H \quad (6)$$

při $dS_2 = l \cdot dr$ dostaneme :

$$\oint J \cdot d\ell_2 = - \frac{\mu}{\rho_0} \int_0^r \frac{\partial H}{\partial t} \ell \cdot dr \quad (7)$$

[6][1]

Pokud je \vec{J} je shodný směr s \vec{I} tak integrál na levé straně bude $(J_0 - J_1)$ a pro harmonický proud přejdeme na symbolicko komplexní počet $Ie^{j\omega t}$ tak dostaneme tvar:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = j\omega \vec{H} \quad (8)$$

upravíme

$$\vec{J} = \vec{J}_0 + \frac{j\omega\mu}{\rho} \int_0^r \vec{H} \cdot d\vec{r} \quad (9)$$

Obdobně napíšeme rovnici pro magnetické pole

$$\vec{H} = \frac{1}{r} \int_0^r \vec{J} \cdot d\vec{r} \quad (10)$$

Pro rovnoměrné rozložení proudu, tedy při $\vec{J} = \vec{J}_0$ a výpočtem z předchozí rovnice pro \vec{H}

$$\vec{H}_0 = \frac{1}{r} \int_0^r \vec{J}_0 \cdot d\vec{r} = \frac{1}{r} \vec{J}_0 \frac{r^2}{2} = \frac{1}{2} \vec{J}_0 r \quad (11)$$

Při tomto rozložení magnetického pole však musí být proudová hustota \vec{J} podle rovnice [(9)]

$$\vec{J}_1 = \vec{J}_0 + \frac{j\omega\mu}{\rho} \int_0^r \frac{1}{2} \vec{J}_0 \cdot d\vec{r} = \vec{J}_0 + \frac{j\omega\mu}{\rho} \cdot \frac{1}{2} \vec{J}_0 \frac{r^2}{2} = \vec{J}_0 \left(1 + \frac{j\omega\mu}{\rho} r^2 \right) \quad (12)$$

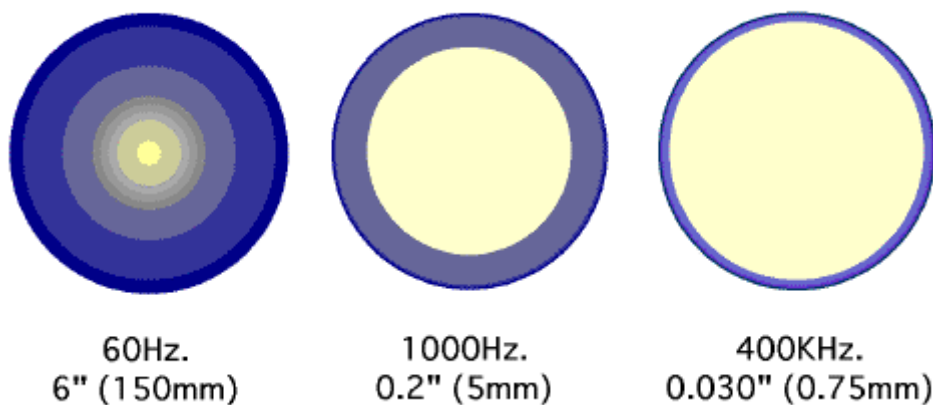
Druhá část tohoto vzorce je pro proudovou hustotu jenž se indukuje od střídavého proudu. Je to vířivý proud, který je časově otočený o 90° proti \vec{I} .

$$\vec{H}_1 = \frac{\vec{J}_0}{r} \int_0^r \left(r + \frac{j\omega\mu}{4\rho} r^3 \right) d\vec{r} = \frac{\vec{J}_0}{r} \left(\frac{r^2}{2} + \frac{j\omega\mu}{16\rho} r^4 \right) = \vec{J}_0 \left(\frac{r}{2} + \frac{j\omega\mu}{16\rho} r^3 \right) \quad (13)$$

V tomto případě představuje druhý člen příspěvek od vířivého proudu k magnetickému poli

$$\begin{aligned} \vec{J}_2 &= \vec{J}_0 + \frac{j\omega\mu}{\rho} \vec{J}_0 \int_0^r \left(\frac{r}{2} + \frac{j\omega\mu}{\rho} r^3 \right) d\vec{r} \\ &= \vec{J}_0 + \frac{j\omega\mu}{\rho} \vec{J}_0 \left(\frac{r^2}{4} + \frac{j\omega\mu}{64\rho} r^4 \right) \\ &= \vec{J}_0 \left(1 + \frac{j\omega\mu}{\rho} \frac{r^2}{4} - \frac{\omega^2 \mu^2}{64\rho^2} r^4 \right) \end{aligned} \quad (14)$$

Když budeme opakovat postup tak by byly poslední členy dostatečně malé, jak je vidět již z prvních členů. Je zřejmý povrchový jev (Skin-Efekt), proudová hustota narůstá směrem k povrchu vodiče a její fáze se bude měnit s místem proudové hustoty ve vodiči. Se zvyšující se permeabilitou, zvyšující frekvencí protékajícího proudu, tvaru, průřezu vodiče a elektrické vodivosti materiálu bude přesun proudové hustoty k povrchu vodiče zřetelnější.



Obr. 2.1.1. Znáznornění rozmístění hustoty (tloušťky materiálu, kterým vede proud) při zvyšování frekvence [11]

Celkový proud vodičem je

$$\dot{I} = \int \dot{J} \cdot ds = \int_0^{r_e} \dot{J} 2\pi r \cdot dr = 2\pi \dot{J}_0 \int_0^{r_e} \left(r + \frac{j\omega\mu}{\rho} \frac{r^3}{4} \right) dr = 2\pi \dot{J}_0 \left(\frac{r_e^2}{2} + \frac{j\omega\mu}{4\rho} \frac{r_e^4}{4} \right) = \pi \dot{J}_0 r_e^2 \left(1 + \frac{j\omega\mu}{8\rho} r_e^2 \right) \quad (15)$$

Proudová hustota v ose vodiče

$$\dot{J}_0 = \left(\frac{\frac{\dot{I}}{\pi r_e^2}}{1 + \frac{j\omega\mu}{8\rho} r_e^2} \right) \quad (16)$$

Proudová hustota ve vodiči

$$\dot{J} = \frac{\dot{I}}{\pi r_e^2} \frac{1 + \frac{j\omega\mu}{\rho} \frac{r^2}{4}}{1 + \frac{j\omega\mu}{\rho} \frac{r_e^2}{8}} \cong \frac{\dot{I}}{\pi r_e^2} \left[1 + \frac{j\omega\mu}{4\rho} \left(r^2 - \frac{r_e^2}{2} \right) \right] \quad (17)$$

$$\text{Protože } \rightarrow \frac{1}{1+x} \cong 1-x \quad \text{ak } x \ll 1 \quad (18)$$

Můžeme tedy napsat pro ztráty ve vodiči platí (za předpokladu, že pruh označuje konjugovanou hodnotu):

$$P_{ST} = \int \rho \dot{J} \dot{J} dv \quad (19)$$

$$P_{ST} = l \int_0^{r_e} \rho \dot{J} \dot{J} 2\pi r dr \quad (20)$$

$$\dot{J} \dot{J} = \left(\frac{\dot{I}}{\pi r_e} \right)^2 \left[1 + \frac{\omega^2 \mu^2}{16 \rho^2} \left(r^2 - \frac{r_e^2}{2} \right)^2 \right] \quad (21)$$

Po dosazení a úpravě získáme vztah (viz skripta tepelný výpočet elektrických přístrojů)

$$P_{ST} = l \int_0^{r_e} \rho \dot{J} \dot{J} 2\pi r dr = \frac{\rho l}{\pi r_e^2} \left(1 + \frac{\omega^2 \mu^2 r_e^2}{192 \rho^2} \right) \quad (22)$$

Ztráty při průchodu stejnosměrného proudu definujeme jako

$$P_{SS} = \frac{\rho l}{\pi r_e^2} I^2 \quad (23)$$

Proto

$$\frac{P_{ST}}{P_{SS}} = \frac{R_{ST}}{R_{SS}} = \frac{\frac{\rho l}{\pi r_e^2} \left(1 + \frac{\omega^2 \mu^2 r_e^2}{192 \rho^2} \right)}{\frac{\rho l}{\pi r_e^2}} = 1 + \frac{\omega^2 \mu^2 r_e^2}{192 \rho^2} = 1 + \frac{1}{48} \left(\sqrt{\frac{\omega \mu}{2 \rho}} r_e \right)^4 \quad (24)$$

S výše zmíněného vztahu lze vyčíst, že přídavné ztráty ve vodiči vzrůstají v závislosti na frekvenci protékajícího proudu, permeabilitě, vodivosti materiálu a průměru vodiče. Záleží přitom na velikosti bezrozměrného výrazu.

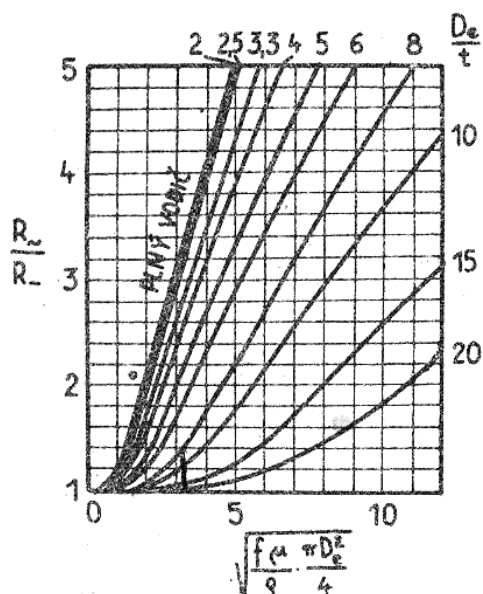
$$\sqrt{\frac{\omega \mu}{2 \rho}} r_e = \sqrt{\frac{f \mu}{\rho}} \pi r_e^2 = \sqrt{\frac{f \mu s}{\rho}} \quad (25)$$

Tento výraz dále lze řešit pomocí tzv Thomsonove funkce. Proud je v tomto případě již tak silně vytlačený na povrch, tudíž vnitřní část vodiče se neúčastní vedení proudu a proud vede jen část materiálu z venkovní strany vodiče. Část vodiče, do něhož jsou rozložena proudová vlákna, se nazývá **hloubka** vniku viz Obr. 2.1.1.

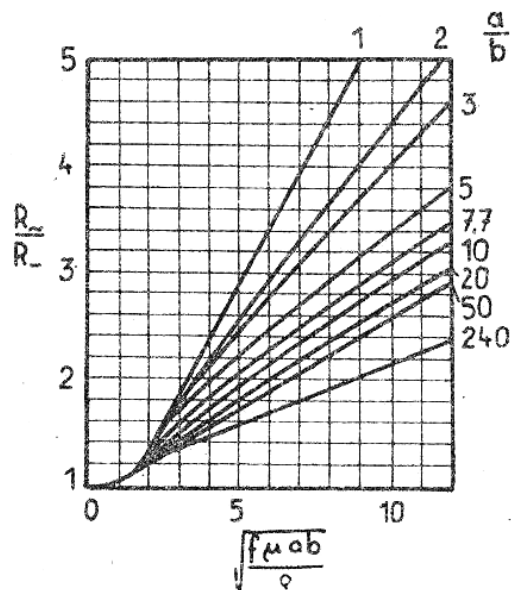
$$\delta = \sqrt{\frac{2 \rho}{\omega \mu}} \quad (26)$$

Proto se na místo vodičů s velkým průřezem používají vodiče ve tvaru trubek. V materiálu může vlivem (např.: proměnlivé permeability, nelinearitou, histerzi) může docházet ke komplikacím se vznikem vířivých proudů.

Grafy přídavných ztrát ve vodičích:



Obr 2.1.2. Zvýšení ztrát pro vodič kruhového průřezu. D_e vnější průřez vodiče (tloušťka stěny trubky) [2]



Obr 2.1.3. Ztráty způsobené při průchodu proudu vodičem obdélníkového průřezu. Vodič obdélníkového průřezu o stranách a,b. [2]

2.1.2. Příklad pro výpočet povrchového jevu

Příklad číslo 1. :

Je dán kruhový vodič o průměru $r_e = 30$ mm při $f = 50$ Hz bude zvýšení ztrát, při teplotě $t = 20^\circ\text{C}$, permeabilita $\mu = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ H.m}^{-1}$

$$\frac{P_{ST}}{P_{SS}} = \frac{R_{ST}}{R_{SS}} = \frac{\frac{\rho l}{\pi r_e^2} \left(1 + \frac{\omega^2 \mu^2 r_e^2}{192 \rho^2} \right)}{\frac{\rho l}{\pi r_e^2}} = 1 + \frac{\omega^2 \mu^2 r_e^2}{192 \rho^2} = 1 + \frac{314^2 (1,25 \cdot 10^{-6})^2 (1,5 \cdot 10^{-2})^2}{192 (1,78 \cdot 10^{-8})^2} = 1,12$$

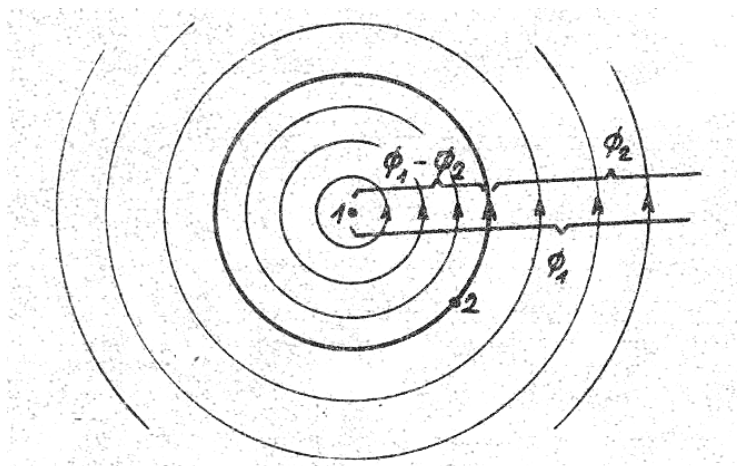
Tedy 12% podle obrázku Obr 2.1.2.

$$\sqrt{\frac{\omega \mu}{2 \rho}} r_e = \sqrt{\frac{314 (1,25 \cdot 10^{-6})}{2 (1,78 \cdot 10^{-8})}} \cdot (1,5 \cdot 10^{-2}) = 1,575$$

Najdeme $R_{ST}/R_{SS} = 1,12$

2.2. Jev blízkosti, vzájemné ovlivnění

Stejně jako Skin-efekt je jev blízkosti závislý na kmitočtu proudu, permeabilitě, elektrické vodivosti a rozměrech, průřezu vodiče.

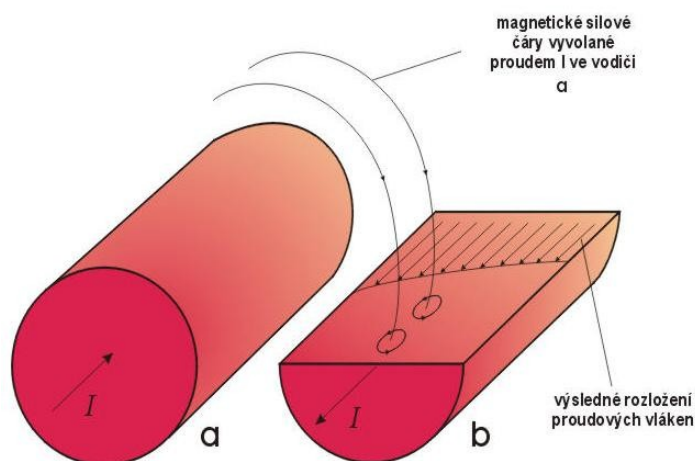


Obr. 2.2.1. Rozložení proudových vláken ve vodiči [2]

Pro nerovnoměrné rozložení proudu ve vodiči za předpokladu, že proudová vlákna jsou zapojena jako paralelní zapojení vodičů, tak proudová vlákna uvnitř svazku jsou vázána větším magnetickým tokem oproti vláknům blíže k okraji svazku vodičů. Tedy lze říct že proudové vlákno č.1 je vázáno magnetickým tokem ϕ_1 a proud vlákna č.2 jenž je blíže k okraji svazku vodičů a je vázáno magnetickým tokem o velikosti ϕ_2 ($\phi_1 \neq \phi_2$). Z toho důvodu je indukčnost vnitřních vláken větší, než indukčnost vláken jenž jsou blíže k okraji svazku, proto mají okrajové proudové vlákna menší impedanci a to má za následek, že při zapojení proudových vláken jako paralelní zapojení poteče vlákny uvnitř svazku menší proud. Tedy i fáze proudu budou rozdílné viz obr 2.2.1.

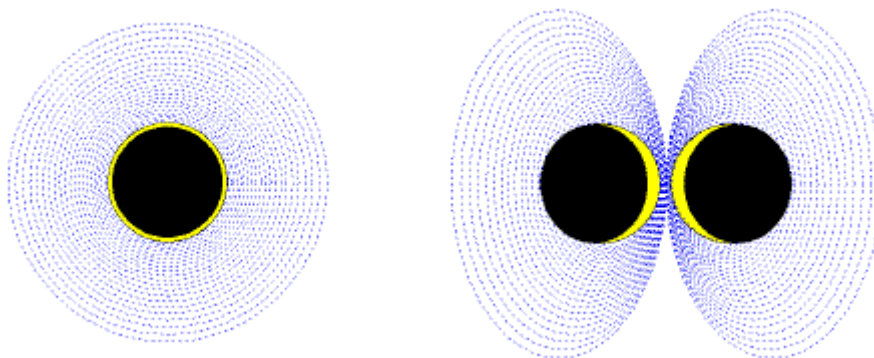
[1]

Viditelné rozdíly velikostí impedancí budou až při větších rozměrech vodičů a při vyšších frekvencích



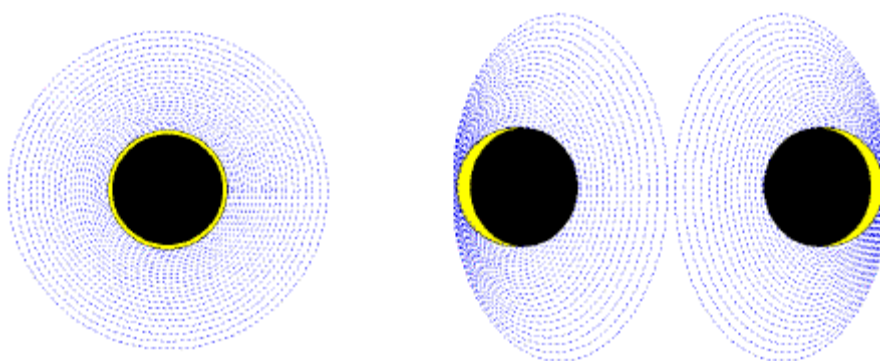
Obr. 2.2.2. Dva vodiče vzdálené od sebe na vzdálenost l za předpokladu, když vodiči budou protékat proudy opačnými směry [9]

Když budeme mít dva plné vodiče vedle sebe o vzdálenosti l a průměru vodiče d a bude každým z nich procházet proud opačným směrem tak dojde k vytlačení proudu směrem k vodiči s opačným směrem procházejícího proudu viz Obr. 2.2.3. a Obr. 2.2.4.



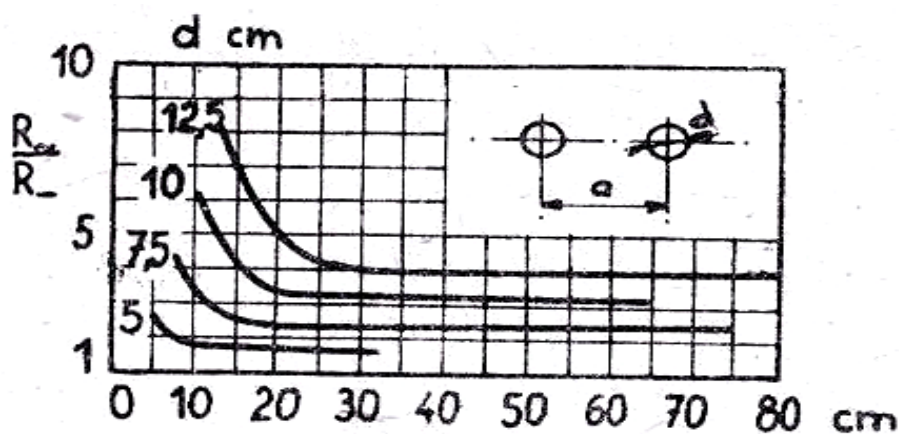
Obr. 2.2.3. Rozložení proudu ve vodičích, jimiž protékají opačnými směry proudy [11]

Dále může nastat obdobná situace jenže proudy ve vodičích budou protékat stejným směrem. V této situaci dojde k vytlačení proudů směrem ke okraji vodiče do prostředí, nikoliv ke okraji směrem k druhému vodiči viz obr. 2.2.3.



Obr. 2.2.4. Rozložení proudu ve vodičích, jimiž protékají proudy ve stejném směru [11]

Pro přehled jevu blízkosti v závislosti na průměru vodiče d , jenž jsou od sebe vzdáleny na vzdálenost a , viz Obr 2.2.5.



Obr. 2.2.5. Údaje o plných vodičích kruhového průřezu vzdálených od sebe na délku a o stejných průměrech vodičů d [1]

2.3. Přesné rozložení střídavého proudu ve vodiči

2.3.1. Odvození pro rozložení střídavého proudu ve vodiči

Z definice pro vektorový potenciál A

$$B = \text{rot} A \quad (27)$$

Základní vztahy pro elektromagnetické pole

$$\text{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (28)$$

$$B = \mu H \quad (29)$$

$$\text{rot} H = J \quad (30)$$

$$E = \rho J \quad (31)$$

A ze základních rovnic pro elektromagnetické pole můžeme odvodit diferenciální rovnice pro pole, jenž se vytváří ve vodiči

$$\nabla^2 A = \frac{\partial \mu J}{\rho \partial t} \quad (32)$$

Provede dosazení základních rovnic

$$\nabla^2 A = \frac{j\omega\mu}{\rho} \dot{A} \quad (33)$$

Rozpis rovnice do složkového tvaru

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_x}{\partial z^2} = \frac{j\omega\mu}{\rho} \dot{A}_x \quad (34)$$

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_y}{\partial z^2} = \frac{j\omega\mu}{\rho} \dot{A}_y \quad (35)$$

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial z^2} = \frac{j\omega\mu}{\rho} \dot{A}_z \quad (36)$$

Aby bylo možné řešit tuto rovnici, musíme brát v úvahu i okrajovou podmínku např. magnetické pole na povrchu vodiče. Proto je možné toto řešení aplikovat jenom ve zvláštních případech jako pro vodiče při vysokých frekvencích nebo pro vodiče kruhového průřezu.

Při velkém průměru a rozměru vodiče nebo vysokých frekvencích se zde uplatňuje Skin-efekt-To až v takové míře, že je magnetické siločáry kopírují povrch vodiče a rozložení proudové hustoty je stejné jako, rozložení náboje v případě elektrostatické úlohy.

V případech potíží s okrajovou podmínkou ji je možnost realizovat pomocí integrální rovnice

$$A_{(M)} = A_0 - \frac{\mu}{4\pi\rho} \int_v \frac{\frac{\partial A_{(N)}}{\partial t}}{\sqrt{(x_M - x_N)^2 + (y_M - y_N)^2 + (z_M - z_N)^2}} dv \quad (37)$$

Integrál se vztahuje pro celkový objem jímž protéká proud. Ve vzdálenosti mezi místy $M(x_M, y_M, z_M)$ a proměnlivým místem $N(x_N, y_N, z_N)$ hledáme hodnotu A v integrační oblasti ji lze najít pomocí vztahu

$$r(MN) = \sqrt{(x_M - x_N)^2 + (y_M - y_N)^2 + (z_M - z_N)^2} \quad (38)$$

Příčemž vektorový potenciál v míst N má hodnotu $A(N)$.

Pro výpočet ztrát ve vodiči při průchodu střídavého proudu pomocí proudové hustoty [1]

$$P_{STR} = \rho \int_V \dot{J} \bar{J} dV \quad (39)$$

nebo

$$P_{STR} = \operatorname{Re} - \int_F \dot{S} dF \quad (40)$$

Z hlediska komplikovaného výpočtu je vhodnější použít pro výpočet přídavných ztrát a rozložení proudu ve vodiči, metodu modelování. Například použití matematického modelování pomocí konečných prvků v programu ANSYS

[1]

2.4. Popis použitého modelovacího softwaru

Program pro modelování pomocí analýzy metodou konečných prvků pro simulaci metod a pro řešení nejnáročnějších inženýrských problémů.

Program ANSYS je obecně nelineární, multifyzikální program zahrnující strukturální a termodynamickou analýzu, analýzu proudění kontinua, analýzu elektrostatických a elektromagnetických polí a akustické analýzy. Veškeré tyto analýzy lze jednak provádět jednotlivě, ale díky multi-fyzikálnímu pojetí programu ANSYS je lze také zahrnout do jediné, společné analýzy. ANSYS umožňuje nejen kontrolní výpočty, ale díky parametrizovaným výpočtovým modelům i citlivostní a optimalizační analýzy a rovněž výpočty spolehlivosti. Všechny programy ANSYS mají certifikaci ISO 9001.

[12]

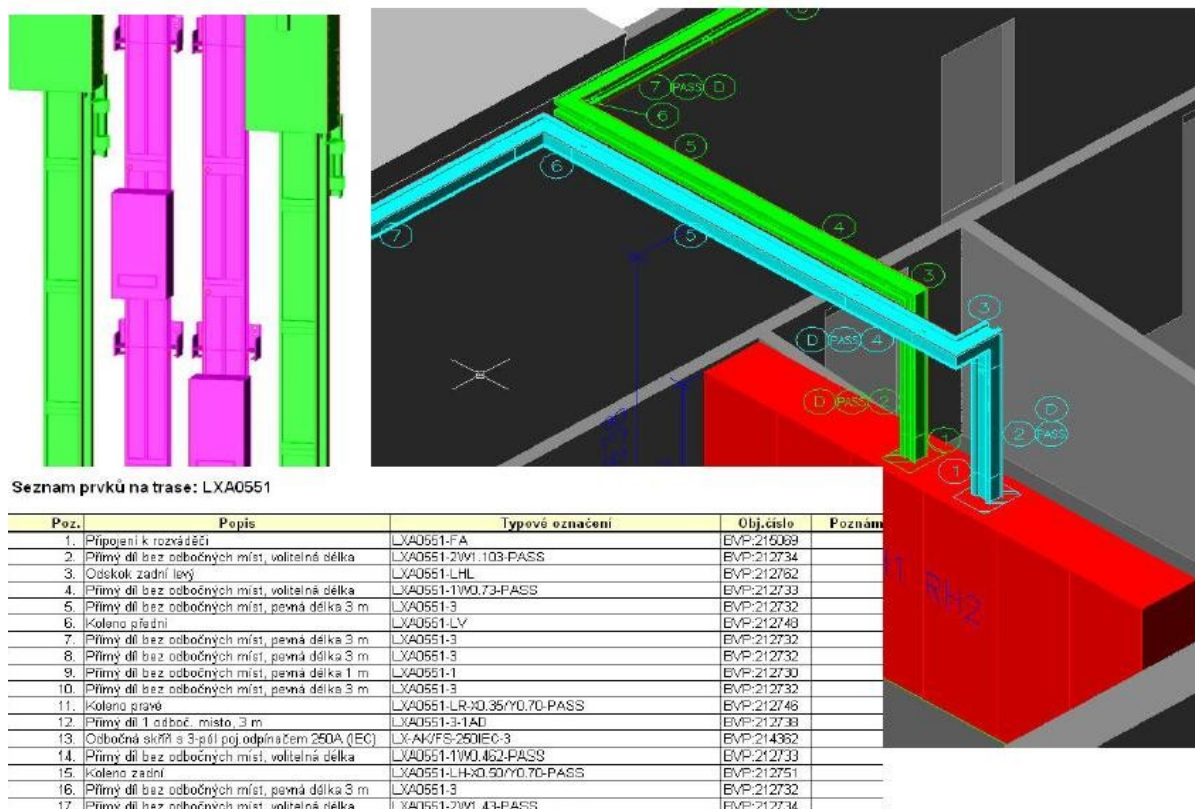


<http://www.ansys.com/>

Programování bylo provedeno ve výpočetním prostředí ANSYS metodou konečných prvků. Byl vytvořen model dané situace, navrženy jeho vlastnosti rozměry a jiné potřebné údaje pro přesný návrh předmětu v dané simulované situaci. Prostředí i předměty byly pokryty výpočetními sítí a navrhnuty jejich okrajové podmínky. Do výpočetního programu byly zadány vzorce pro vypočtení požadovaných hodnoty a grafického rozložení potřebných údajů.

2.5. Přípojnice a Přípojnicové systémy

V současné době jsou v oblasti rozvodu elektrické energie klasické kabely, kabelové žlábký apod. nahrazovány modernějšími způsoby pro přenos elektrické energie. Tyto způsoby se nazývají přípojnicovými systémy viz obr. 2.5.1. Přípojnicové systémy zajišťují širokou použitelnost v nejrůznějších provozních podmínkách a prostředích. Jednotlivé přípojnicové systémy se rozdělují dle velikosti přenášeného jmenovitého proudu, konstrukce, tvaru, krytí, konfigurace proudových drah a dalších aspektů. Přípojnicové systémy se realizují z několika částí, např.: přípojky, přípojnice přímé nebo s odbočkami, přípojnice s určitou délkou nebo volitelnou délkou viz obr 2.5.2., kolena i odbočky viz obr. 2.5.3., přípojnice s určitou délkou nebo volitelnou délkou, díly pro prostorový odskok, spojky a další součásti viz obr. 2.5.1.

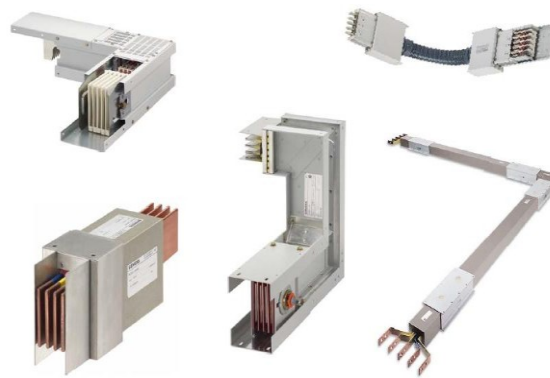


Obr. 2.5.1. Ukázka části projektu přípojnicového systému firmy Siemens s částí rozpočtu [7]

Tyto přípojnicové systémy jsou jednoduché na projektování viz obr 2.5.1. Realizace těchto přípojnicových systémů je pohodlná to díky předpokládaným spojům, inteligentním spojkám a jednoduché montáži. Přípojnicové systémy vynikají také bezpečností s vysokou zkratovou odolností, možností jištění jednotlivých spotřebičů a velká úspora místa s přívětivým vizuálním provedením. [7]



Obr. 2.5.2. Typy různých přípojníc firmy Siemens [10]



Obr. 2.5.3. Typy odboček a kolena firmy Siemens [7]

2.5.1. Výrobci přípojníc a přípojnícových systémů

V současné době je na trhu více firem, které se zabývají přípojnícemi a přípojnícovými systémy, např.: ABB s.r.o. ,Wöhner GmbH & Co. KG, Legrand s.r.o. ,Hager s.r.o. ,Moeller s.r.o. ,OEZ s.r.o. (od roku 2007 je součástí skupiny Siemens) a největší výrobce zabývající se nejenom přípojnícemi a přípojnícovými systémy Siemens s.r.o.

2.5.2. Katalogy přípojníc a přípojnícových systémů

Každý výrobce u svých katalogů s přípojnícemi a přípojnícovými systémy uvádí informace, které považuje za důležité. Pro srovnání uvádím ukázky výrobků z katalogů jednotlivých firem viz Obr 2.5.4. a 2.5.5.

≤ 4000 A													
Držáky Cu přípojníc		Obj. č. 373 24 (XL ³ fixní) Obj. č. 373 25 (XL ³ posuvný)											
Konfigurace Cu přípojníc		1 až 4 přípojníc na pól tloušťky 5 mm - 1 až 3 přípojníc na pól tloušťky 10 mm											
Cu přípojníc ploché		1 přípojníc		2 přípojníc		3 přípojníc		4 přípojníc					
		I (A)		I (A)		I (A)		I (A)		I (A)		I (A)	
		IP ≤ 30	IP > 30	IP ≤ 30	IP > 30	IP ≤ 30	IP > 30	IP ≤ 30	IP > 30	IP ≤ 30	IP > 30	IP ≤ 30	IP > 30
Obj. číslo		Rozměr (mm)											
374 40		50 x 5		700		630		500		420		1180	
374 41		63 x 5		800		700		600		500		1380	
374 59		75 x 5		950		850		700		600		1600	
374 43		80 x 5		1000		900		750		630		1700	
374 46		100 x 5		1250		1050		850		700		2050	
		125 x 5		1450		1270		1000		800		2500	
		80 x 10		1460		1270		1150		950		2500	
		100 x 10		1750		1500		1350		1150		3050	
		120 x 10		2000		1750		1650		1450		3600	

Obr. 2.5.4. výběr katalogu přípojníc od firmy Legrand pro rozvodny do 4000A

Rozměry sběnice ⁽¹⁾ (mm)	Průřez (mm ²)	Proudová zatížitelnost (A) ⁽²⁾			Rozměry sběnice ⁽¹⁾ (mm)	Průřez (mm ²)	Proudová zatížitelnost (A) ⁽²⁾		
		Δt 20 °C ⁽³⁾	Δt 40 °C ⁽⁴⁾	Δt 50 °C ⁽⁵⁾			Δt 20 °C ⁽³⁾	Δt 40 °C ⁽⁴⁾	Δt 50 °C ⁽⁵⁾
9 x 0,8 x 4	28,8	120	180	210	50 x 1 x 3	150	400	570	650
9 x 0,8 x 6	43,2	160	230	270	50 x 1 x 4	200	490	700	790
13 x 0,5 x 4	26	120	170	190	50 x 1 x 5	250	540	780	880
13 x 0,5 x 6	39	140	200	225	50 x 1 x 6	300	590	840	950
15,5 x 0,8 x 2	24,8	125	175	200	50 x 1 x 8	400	680	1000	1130
15,5 x 0,8 x 4	49,6	195	265	295	50 x 1 x 10	500	750	1100	1300
15,5 x 0,8 x 6	74,4	225	320	360					
15,5 x 0,8 x 10	124	300	420	480	63 x 1 x 4	252	550	780	880
					63 x 1 x 5	315	650	900	1000
20 x 1 x 2	40	170	240	270	63 x 1 x 6	378	690	980	1100
20 x 1 x 3	60	230	320	360	63 x 1 x 8	504	840	1200	1350
20 x 1 x 4	80	270	380	440	63 x 1 x 10	630	920	1300	1450
20 x 1 x 5	100	300	430	490	63 x 1 x 12	756	1050	1450	1600
20 x 1 x 6	120	330	470	530					
20 x 1 x 10	200	420	580	650					

Obr. 2.2.5. výběr z katalogu přípojníc od firmy Corex rozdělení dle rozměrů

Přípojníc splňují nejprísnější bezpečnostní normy a vyhlášky pro používání a provoz v nejrůznějších prostorech a podmínkách pro příklad viz Obr 2.2.6. Firmy, které se zabývají projektováním a výrobou přípojníc ve svém katalogu dále uvádějí případné další informace o přehledu vlastností izolačního, vodivého, konstrukčního materiálu, jenž byl použit u přípojníc.(viz Obr 2.2.6., 2.2.7. [7])

Vlastnosti izolace	Jednotka	Hodnota	Testováno dle
• Materiál izolace		Termoplast	
• Způsob výroby izolace		Protlačováním	CEI 20-14, CEI 20-35
• Samozhášitelnost		UL94V0	
• Hustota	kg/dm ³	1,4	ISO 1183
• Kyslíkový index	%	23	ASTM D2863
• Tvrdost (dle Shorea)	Shore A	76	ISO 868
• Mezní zatížení	N/mm ²	15	ISO 527
• Mez pružnosti	%	>300	ISO 527
• Teplotní stabilita	min	210	ISO 182 A
• Dielektrická pevnost	Kv/mm	>20	ASTM D 149
• Jmenovitý odpor při 20 °C	$\Omega \times \text{cm}^2/\text{cm}$	2×10^{13}	ASTM D 257

Obr. 2.2.6. část katalogu firmy corex - jako příklad použit norem

Technické parametry						
Přímé díly						
Typ		BD01-40	BD01-63	BD01-100	BD01-125	BD01-160
Proudovodné dráhy						
jmenovité izolační napětí U_i	V AC/DC	400/400	400/400	400/400	400/400	400/400
kategorie přepětí/stupeň znečištění		III/3	III/3	III/3	III/3	III/3
jmenovité provozní napětí U_e	V AC	400	400	400	400	400
frekvence	Hz	50 ... 60	50 ... 60	50 ... 60	50 ... 60	50 ... 60
jmenovitý provozní proud I_e = konvenční term. proud při max. 40°C a 35°C, stř. hodnota za 24 hod	A	40	63	100	125	160
impedance proudových drah při 50 Hz a 20°C proudových vodičů						
• činný odpor R_{20}	mΩ/m	3,960	1,936	0,938	0,910	0,578
• jalová impedance X_{20}	mΩ/m	0,280	0,324	0,286	0,300	0,273
• zdánlivá impedance Z_{20}	mΩ/m	3,970	1,968	0,994	1,000	0,642
impedance proudových drah v případě poruchy						
• činný odpor při střídavém proudu R_F	mΩ/m	5,991	4,128	2,841	2,420	2,189
• jalová impedance X_F	mΩ/m	1,396	1,248	1,186	0,940	0,973
• zdánlivá impedance Z_F	mΩ/m	6,151	4,312	3,078	2,600	2,395
nulová impedance dle IEC/EN 60909 (VDE 0102)						
• činný odpor R_0	fáze-N mΩ/m	15,904	7,911	4,115	3,810	3,167
• jalová impedance X_0	fáze-N mΩ/m	2,128	2,058	1,797	1,630	1,656
• zdánlivá impedance Z_0	fáze-N mΩ/m	16,045	8,175	4,490	4,140	3,574
• činný odpor R_0	fáze-PE mΩ/m	10,086	8,565	6,648	5,430	5,343
• jalová impedance X_0	fáze-PE mΩ/m	2,909	3,338	3,067	2,320	2,355
• zdánlivá impedance Z_0	fáze-PE mΩ/m	10,498	9,183	7,322	5,910	5,839
Zkratová odolnost						
špičková hodnota I_{pk}	kA	2,55	6,30	15,30	15,30	15,30
krátkodobý výdržný zkrat. proud $I_{ow}(t = 1 \text{ s})$	kA	0,58	1,15	2,50	2,50	2,50
krátkodobý výdržný zkrat. proud $I_{ow}(t = 0,1 \text{ s})$	kA	1,70	4,20	9,00	9,00	9,00
Vodiče proudu						
počet aktivních vodičů		4	4	4	4	4
průřezy vodičů						
• L1, L2, L3	mm ²	7,9	15,7	34,1	34,1	34,1
• N	mm ²	7,9	15,7	34,1	34,1	34,1
• PE (zapouzdření) = Cu	mm ²	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
materiál vodičů		Al	Al	Al	Al	Cu
Požární zátěž	kWh/m	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
Max. termická zátěž, I^2t -hodnota	A ² s × 10 ⁶	0,29	1,76	8,10	8,10	8,10
Vzdálenost upevňovacích míst při obvyklém mechanickém zatížení						
• na hraně	m	3	3	3	3	3
• na plocho	m	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
• na plocho, při použití BD01-BAP	m	3	3	3	3	3

Obr. 2.2.7. přehled hodnot použitých materiálu, použitých pro přípojnice, které jsou změřeny nebo vypočítány firmou, jež je vyrábí a uveden v katalogu (katalog firmy Siemens)

2.6. Výpočet odporu

Uvažujeme-li dlouhý vodič s odporem R , jímž protéká elektrický proud I tak v každém časovém okamžiku dt v něm vznikají tepelné ztráty do okolí.

$$P = RI^2 \quad (41)$$

2.6.1. Jouleovy ztráty

Množství unikl tepelných ztrát je dáno (z Jouleovy rovnice) $\alpha_0 A dt$, α_0 (W/m².K) se nazývá součinitel přestupu tepla do okolí, S (m²) je velikost povrchu úseku vodiče, jímž teplo uniká do okolí při okamžité změně teploty tělesa oproti okolí $\Delta\theta$ (K).

Dále část tepla, protéká-li proudem vodičem, ve vodiči zůstává a napomáhá zvýšení hodnoty teploty vodiče o $d(\Delta\theta)$ tedy o $d\theta$. Teplo spotřebované ke zvýšení teploty vodiče lze definovat jako $cVd\theta$ kde c je objemová tepelná kapacita úseku vodiče, jenž se otepluje. Oteplení probíhá v objemu vodiče V (m³)

$$RI^2 dt = \alpha_0 S \Delta\theta dt + cVd\theta \quad (42)$$

2.6.2. Elektrický odpor

Pro určení tepelných ztrát vodiče, kterým protéká elektrický proud je potřeba znát elektrický odpor vodiče. Za předpokladu, že proud protékající proudem vodičem je rovnoměrně rozložen po průřezu vodiče S a délce vodiče l jenž je konstantní platí vztah pro výpočet elektrického odporu $R(\Omega)$.

$$R = \rho_{MAT} \frac{l}{S} \quad (43)$$

V tomto vztahu l (m) naznačuje délku vodiče, S (m) průřez vodiče a ρ_{MAT} elektrickou rezistivitu ($\Omega \cdot m$). Rezistivita je materiálová vlastnost, je závislá na teplotě.

Při průtoku střídavého proudu vodičem se určuje elektrický odpor ze vztahu

$$R_{ST} = t_{RF} (1 + \alpha_{TR} \Delta\theta) \frac{l}{S} k_P k_b \quad (44)$$

$$R_{ST} = \frac{\rho l}{\pi r_e^2} \left(1 + \frac{\omega^2 \mu^2 r_e^2}{192 \rho^2} \right) \quad (45)$$

α_{TR} – součinitel teplotního odporu (K⁻¹)

t_{RF} – referenční teplota (K)

k_P – činitel povrchového zhuštění (Skin-efekt)

k_b – činitel jevu blízkosti (Jev blízkosti)

Při průtoku stejnosměrného proudu vodičem se určuje elektrický odpor ze vztahu

$$R_{SS} = \frac{\rho l}{\pi r_e^2} I^2 \quad (46)$$

3. Srovnání již vypočtených příkladů se simulovanými případy

3.1. Simulace samostatného kruhového vodiče

Namodeloval jsem případ, kdy ve vzduchové atmosféře je uložen samostatný vodič kruhového průřezu $r[\text{mm}]$ z mědi. Průřez tohoto vodiče jsem dle svého uvážení měnil a sledoval, jak se budou měnit jeho ztráty a rozložení proudu ve vodiči (skin efekt).

3.1.1. Tabulka hodnot nasimulovaného kruhového vodiče

Tab. 3.1. vypočtené hodnoty pomocí programu při změně průřezu kruhového vodiče

Samostatný vodič kruhového průřezu											
d	mm	1,5	2	2,5	5	10	20	30	40	50	75
δ	m	9,50E-03	9,50E-03	9,50E-03	9,50E-03	9,50E-03	9,50E-03	9,50E-03	9,50E-03	9,50E-03	9,50E-03
P_{DC}	W	10072,74	5665,91	3626,18	906,546	226,636	56,6591	25,18	14,1647	8,0654	4,02909
P_{AC}	W	10072,74	5665,93	3826,209	906,637	226,999	58,0816	28,14	18,5726	14,2734	9,05975
k_p	-	1,000008	1,000003	1,000006	1,0001	1,00159	1,02510	1,1176	1,31118	1,57448	2,24858

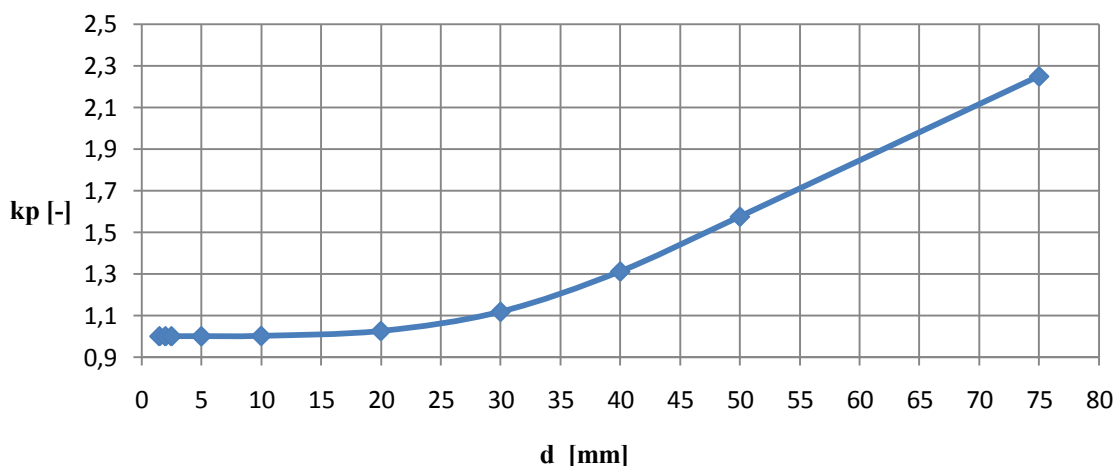
d	[mm]	volitelný parametr
δ	[m]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (26)
P_{DC}	[W]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (23)
P_{AC}	[W]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (22)
k_p	[-]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (22)

3.1.2. Popis případu

Z Tabulky 3.1. jsem hodnoty vynesl do grafu aby bylo zřejmé, jak se budou vypočtené hodnoty měnit se změnou průřezu. Z vypočtených hodnot je vidět, že činitel hloubky vniku δ je pro všechny průřezy vodičů neměnný čili konstantní, to je způsobeno materiálem, ze kterého je vodič namodelován popřípadě vyroben.

3.1.3. Průběhy pro kruhový vodič

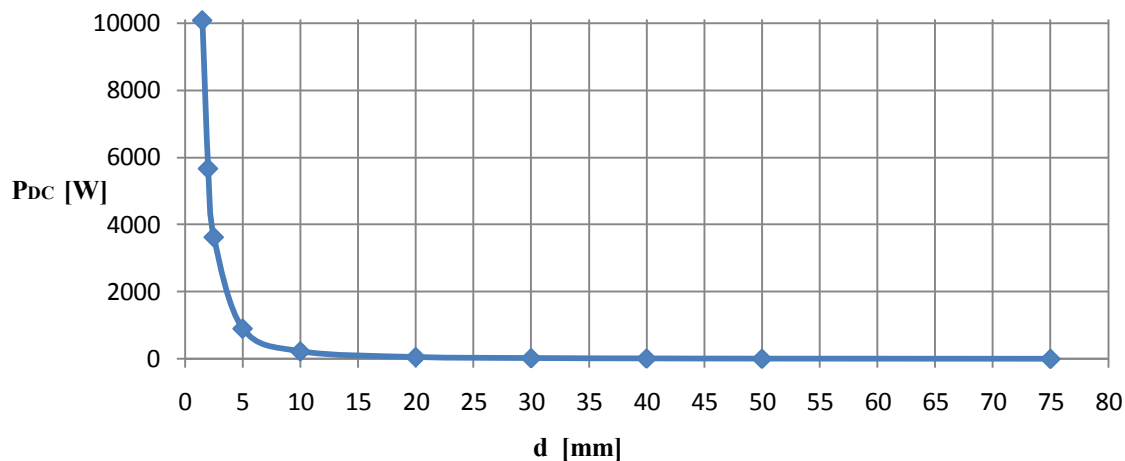
Činitel povrchového jevu



Graf 3.1. Závislost činitele povrchového jevu (skin efektu) na změně průřezu kruhového vodiče

Průběh viz graf 3.1. udává, jak se bude měnit rozložení proudové hustoty (skin efekt) vzhledem ke změně průřezu vodiče. S průběhu je zřejmé že se zvyšujícím se průřezem vodiče se rozložení přenosu proudu vodičem vytlačuje směrem k povrchu vodiče, z toho důvodu se používají na místo vodičů s velkým průřezem spíše vodiče trubkového tvaru.

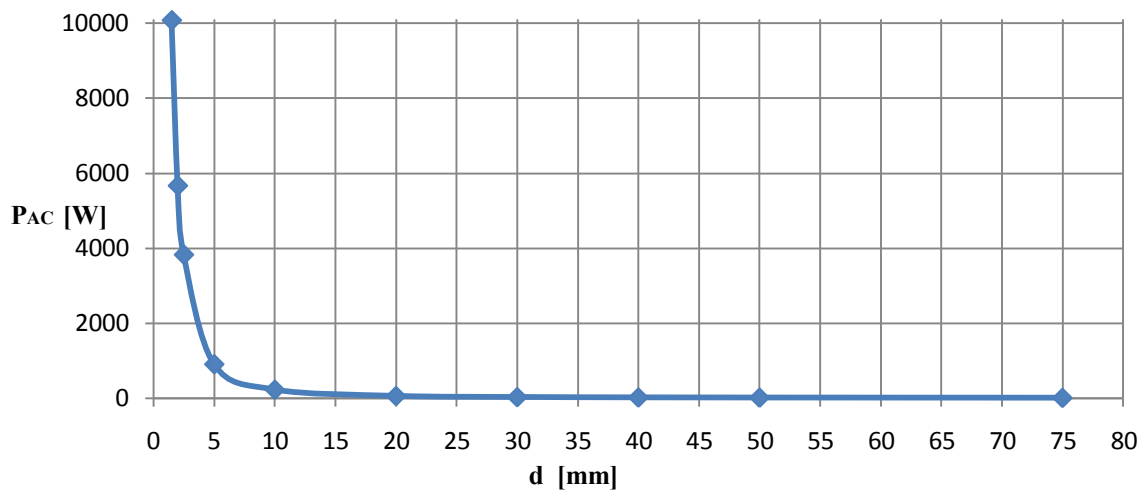
Ztráty DC



Graf 3.2. Ztráty ve vodiči způsobené průchodem stejnosměrného proudu vodičem v závislosti na změně průřezu vodiče

Je patrné, že se zvyšující se průřezu vodiče budou ztráty ve vodiči způsobené průchodem stejnosměrného proudu se zmenšovat viz graf 3.2.

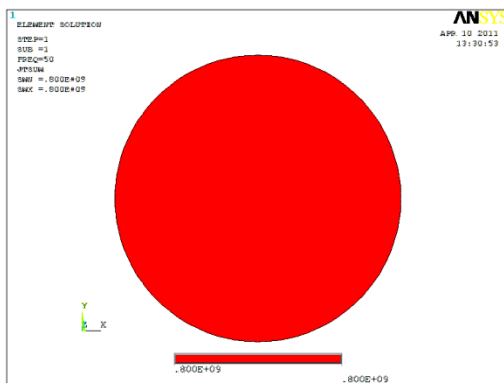
Ztráty AC



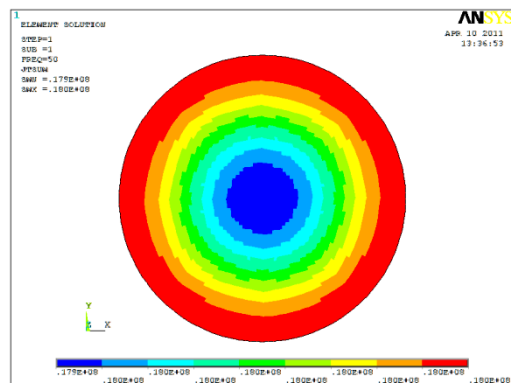
Graf 3.3. Ztráty ve vodiči způsobené průchodem střídavého proudu vodičem v závislosti na změně průřezu vodiče

Jako u předchozího případu ztrát způsobených průchodem stejnosměrného proudu vodičem tak je i zde patrné viz graf 3.3., že se zvyšující se průřezu vodiče budou ztráty ve vodiči způsobené průchodem střídavého proudu vodičem se zmenšovat v závislosti na zvyšujícím se průřezu vodiče.

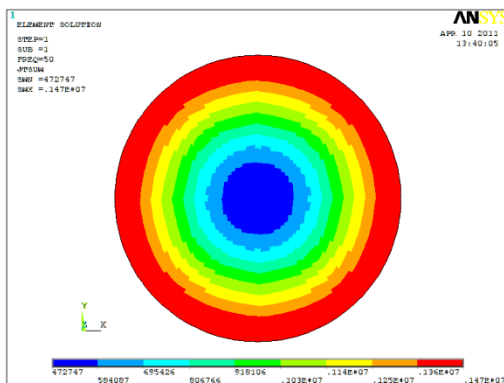
3.1.4. Náhled rozložení proudové hustoty ve vodiči



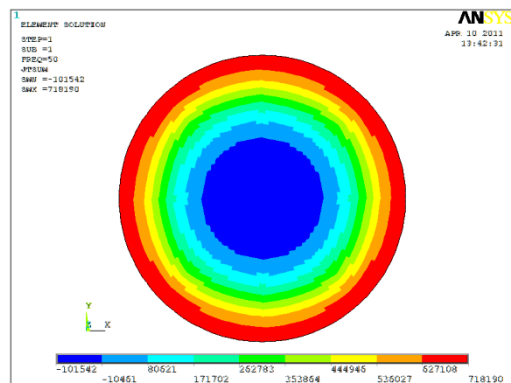
Obr. 3.1.4.1. rozložení proudu pro vodič kruhového průřezu o průměru r=1,5mm



Obr. 3.1.4.2. rozložení proudu pro vodič kruhového průřezu o průměru r=10mm



Obr. 3.1.4.3. rozložení proudu pro vodič kruhového průřezu o průměru r=40mm



Obr. 3.1.4.4. rozložení proudu pro vodič kruhového průřezu o průměru r=75mm

3.1.5. Srovnání s příkladem výpočtu povrchového jevu u kruhového vodiče

3.1.5.1. Popis případu z předchozího příkladu:

Pro porovnání jsem namodeloval vypočtený příklad číslo 1 v programu ANSYS.

Za předpokladu zachování parametrů stejné proudové hustoty $\rho = 1,78 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $t = 20^\circ \text{C}$, $r_e = 30 \text{ mm}$, $\mu = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$, proud protékající vodičem $I = 1000 \text{ A}$

3.1.5.2. Dle analytického výpočtu z předchozího příkladu:

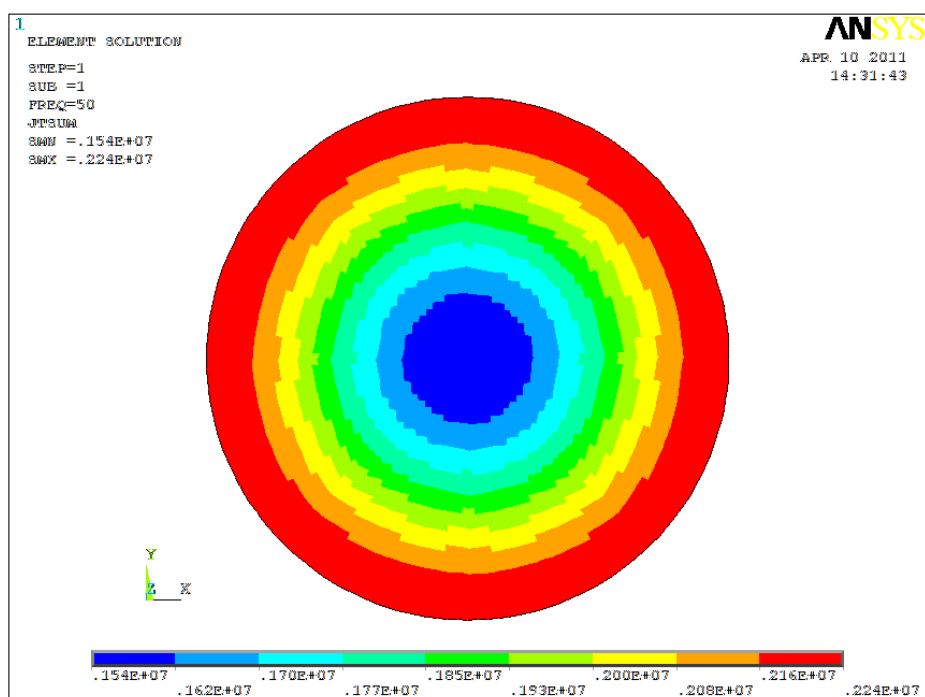
$$\frac{P_{ST}}{P_{SS}} = \frac{R_{ST}}{R_{SS}} = \frac{\frac{\rho l}{\pi r_e^2} \left(1 + \frac{\omega^2 \mu^2 r_e^2}{192 \rho^2} \right)}{\frac{\rho l}{\pi r_e^2}} = 1 + \frac{\omega^2 \mu^2 r_e^2}{192 \rho^2} = 1 + \frac{314^2 (1,25 \cdot 10^{-6})^2 (1,5^2 \cdot 10^{-4})^2}{192 (1,78 \cdot 10^{-8})^2} = 1,12$$

3.1.5.3. Vypočtené hodnoty pomocí programu ANSYS :

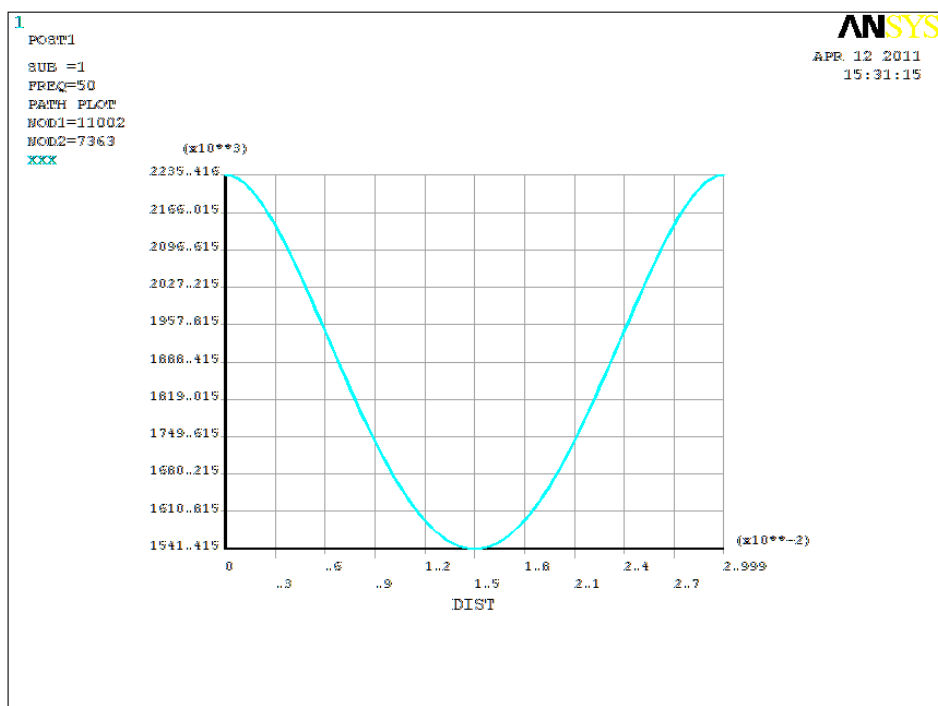
Činitel povrchového jevu
Ztráty při stejnosměrném proudu
Ztráty při střídavém proudu
Hloubka vniku

$k_p = 1,1176$
 $P_{DC} = 25,1818 \text{ W}$
 $P_{AC} = 28,143 \text{ W}$
 $\delta = 9,49609 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

3.1.5.4. Náhled rozložení proudové hustoty ve vodiči



Obr. 3.1.5.4.1. Zobrazení namodelovaného rozložení proudové hustoty pro vodič o průměru 30mm, pro výše uvažované parametry



Obr. 3.1.5.4.2. Rozložení proudu mezi okraji vodiče (okraje vodiče jsou definovány dvěma body)

Zhodnocení:

Namodelovaný případ pro činitel povrchového jevu ve vodiči, který vypočet simulační program je $k_p = 1,1176$ tak se téměř shoduje s vypočtenou hodnotou činitele povrchového jevu $k_p = 1,12$, který je výše vypočítán v příkladu číslo 1.

3.2. Obdélníkový vodič

3.2.1. Samostatný obdélníkový vodič

3.2.1.1. Tabulka hodnot nasimulovaného obdélníkového vodiče

Tab. 3.2. Hodnoty pro namodelovaný případ obdélníkového vodiče Cu ve vzduchovém prostředí při změně velikostí stran pro pevnou šířku strany $b = 4\text{cm}$

Samostatný vodič obdélníkového průřezu - šířka $b=4\text{cm}$											
b	m	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
h	m	0,04	0,07	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
δ	m	9,5E-3	9,5E-3	9,5E-3	9,5E-3	9,5E-3	9,5E-3	9,5E-3	9,5E-3	9,5E-3	9,5E-3
P_{DC}	W	11,125	6,357	4,450	2,967	2,225	1,780	1,483	1,271	1,113	0,989
P_{AC}	W	16,667	11,885	9,334	6,987	5,638	4,752	4,121	3,647	3,277	2,979
k_p	-	1,4981	1,8695	2,09763	2,35520	2,53411	2,66984	2,77851	2,86877	2,94568	3,01257

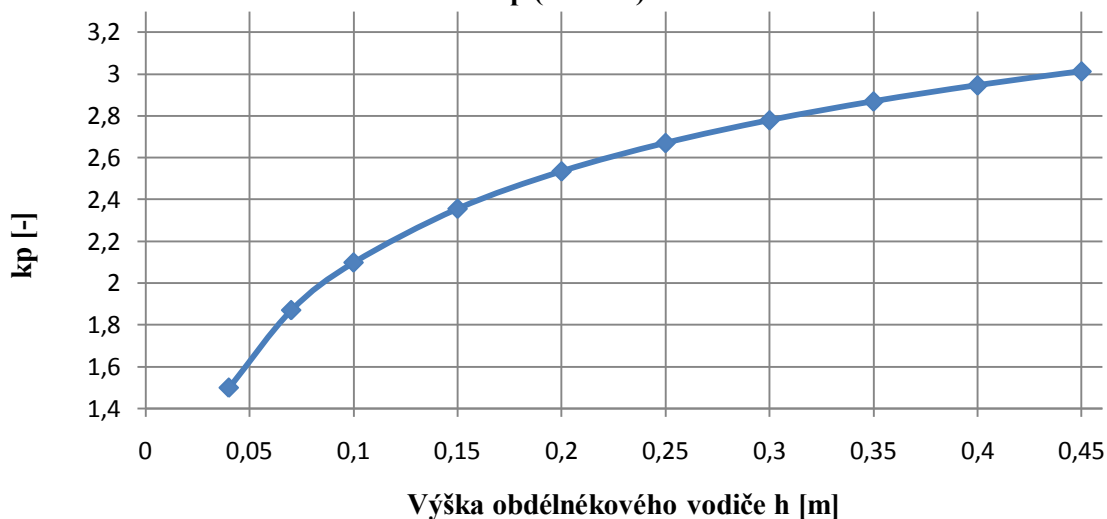
b	[m]	volitelný parametr šířky vodiče
h	[m]	volitelný parametr výšky vodiče
δ	[m]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (26)
P_{DC}	[W]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (23)
P_{AC}	[W]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (22)
k_p	[-]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (22)

3.2.1.2. Popis případu

Namodeloval jsem případ, kdy ve vzduchové atmosféře je uložen samostatný vodič z mědi obdélníkového průřezu o stranách b a h . Simuloval jsem případ, kdy se bude měnit pouze jedna stran obdélníkového vodiče v mém případě jsem si zvolil výšku vodiče h , jako neproměnlivou stranu jsem zvolil šířku vodiče b . Neměnnou šířku b jsem nastavil na hodnotu 4cm a pozoroval jsem, jaký bude mít vliv změna jedné strany obdélníkového vodiče na ztráty a rozložení proudové hustoty ve vodiči. Nasimulované hodnoty jsem zapsal do Tabulky viz tab 3.2.

3.2.1.3. Průběhy pro obdélníkový vodič

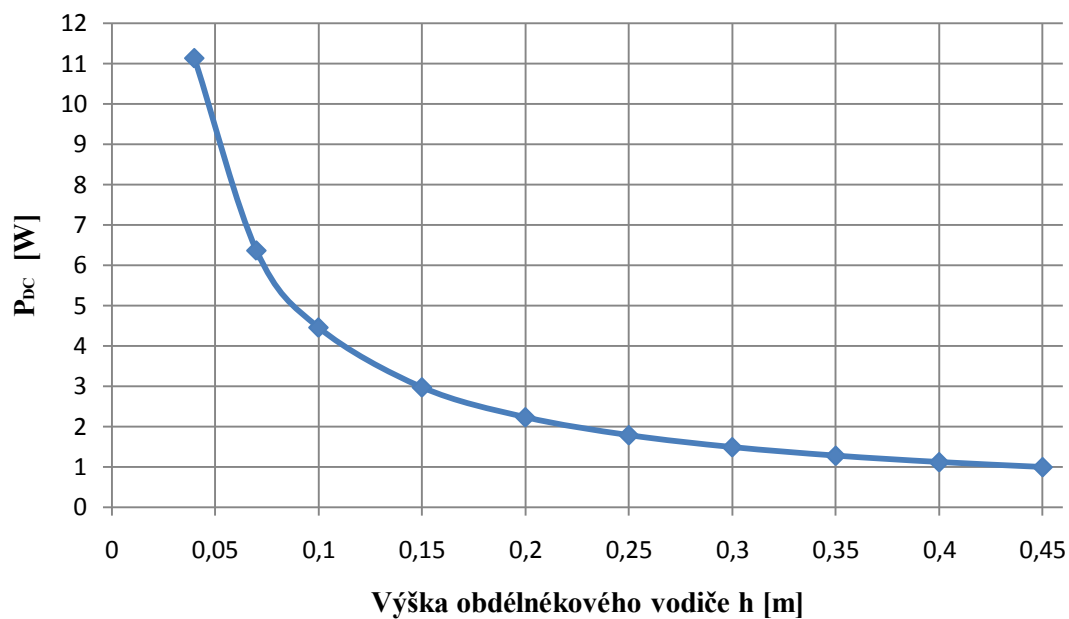
Vliv změny strany h obdélníkového vodiče na činitel povrchového jevu
 k_p ($b=4\text{cm}$)



Graf č. 3.2.1. Závislost činitele povrchového jevu na změně pouze jedné stran obdélníkového vodiče h

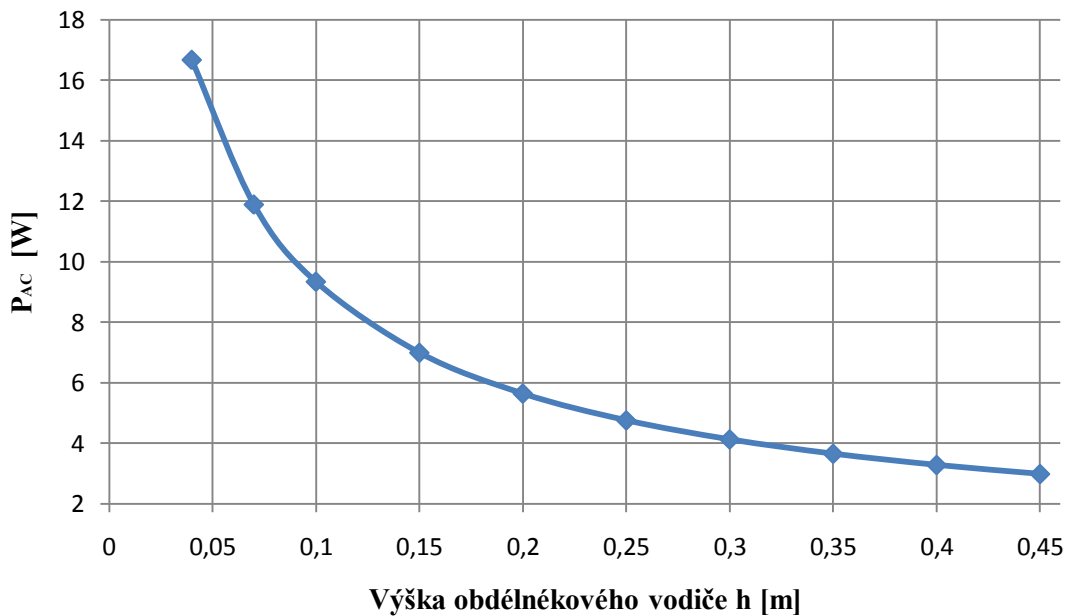
Z Grafu 3.2.1. je zřejmé, že se zvyšující se hodnotou délky strany h u obdélníkového vodiče se bude činitel povrchového jevu zvětšovat, to má za následek vytlačení aktivních proudových vláken směrem ke straně b obdélníkového vodiče viz obr. č. 24 a 25.

Ztráty DC



Graf 3.2.2. Ztráty ve vodiči způsobené průchodem stejnosměrného proudu vodičem v závislosti na změně strany h ($b = 4\text{cm}$)

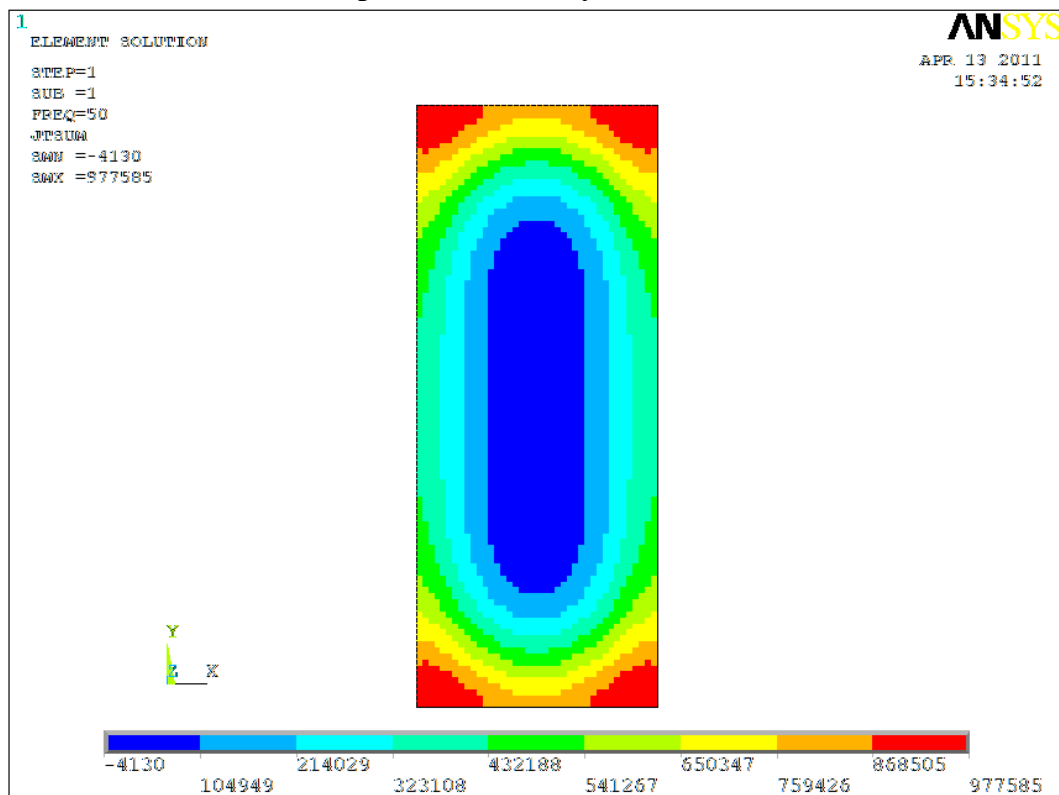
Ztráty AC



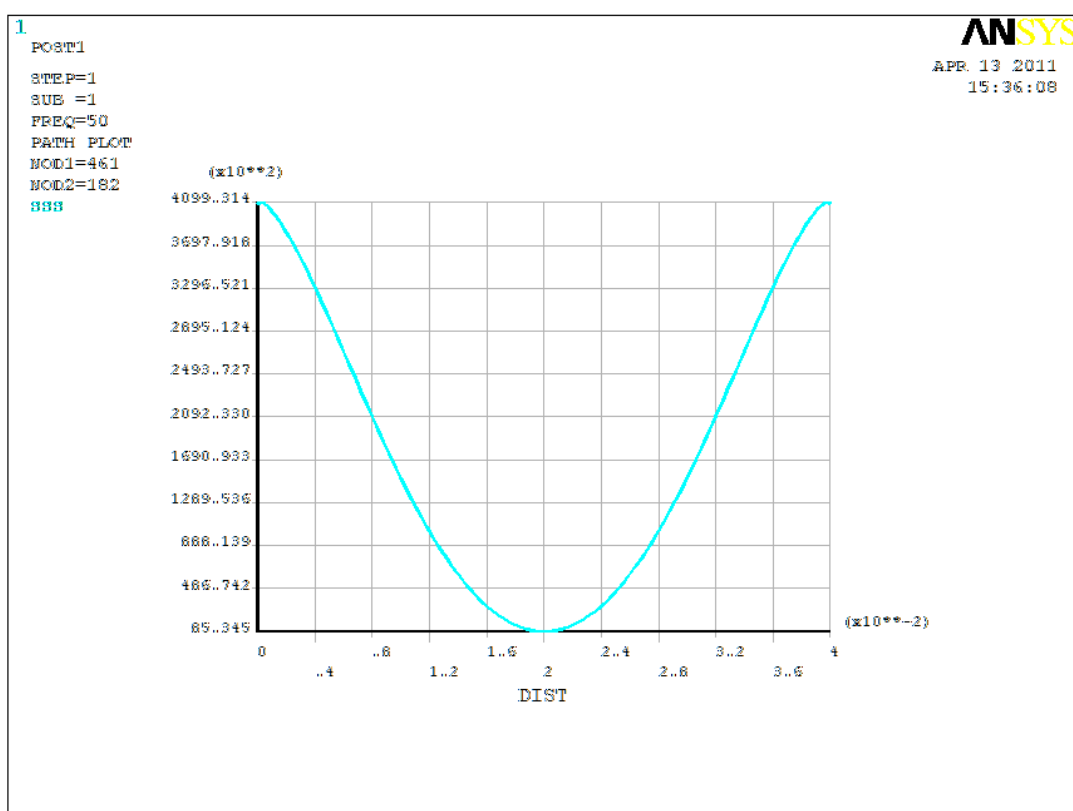
Graf 3.2.3. Ztráty ve vodiči způsobené průchodem střídavého proudu vodičem v závislosti na změně strany h ($b = 4\text{cm}$)

Z průběhů ztrát viz Graf 3.2.2. a 3.2.3., je patrné, že se změnou objemu obdélníkového vodiče, kterou má za následek změna délky strany h obdélníkového vodiče, při zachování nezměnění strany b , se bude velikost ztrát ve vodiči zmenšovat.

3.2.2. Náhled rozložení proudové hustoty ve vodiči



Obr. 3.2.2.1. Rozložení proudové hustoty v obdélníkovém vodiči z Tabulky č.2



Obr. 3.2.2.2. Křivka pro přesnější rozložení proudové hustoty v obdélníkovém vodiči z Tabulky č.2

Pro nasimulovaný případ obdélníkového vodiče, jsem zachytil proudové rozložení viz obr 3.2.2.1.a 3.2.2.2. Aby bylo proudové rozložení zřetelnější v programu ANSYS jsem vytvořil i průběh proudu v grafu viz obr. 3.2.2.2. Pro níže uvedení hodnoty vodiče, vytažené z tab 3.2.

b	[m]	0,04	volitelný parametr šířky vodiče
h	[m]	0,1	volitelný parametr výšky vodiče
δ	[m]	9,5E-3	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (26)
P_{DC}	[W]	4,450	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (23)
P_{AC}	[W]	9,334	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (22)
k_p	[-]	2,09763	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (22)

3.2.3. Samostatný obdélníkový vodič při změně stran vodiče v poměru (h:b) 2:1

3.2.3.1. Tabulka hodnot nasimulovaného obdélníkového vodiče

Tab. 3.3. Hodnoty pro namodelovaný případ obdélníkového vodiče Cu ve vzduchovém prostředí při změně velikostí stran v daném poměru stran (h:b) 2:1

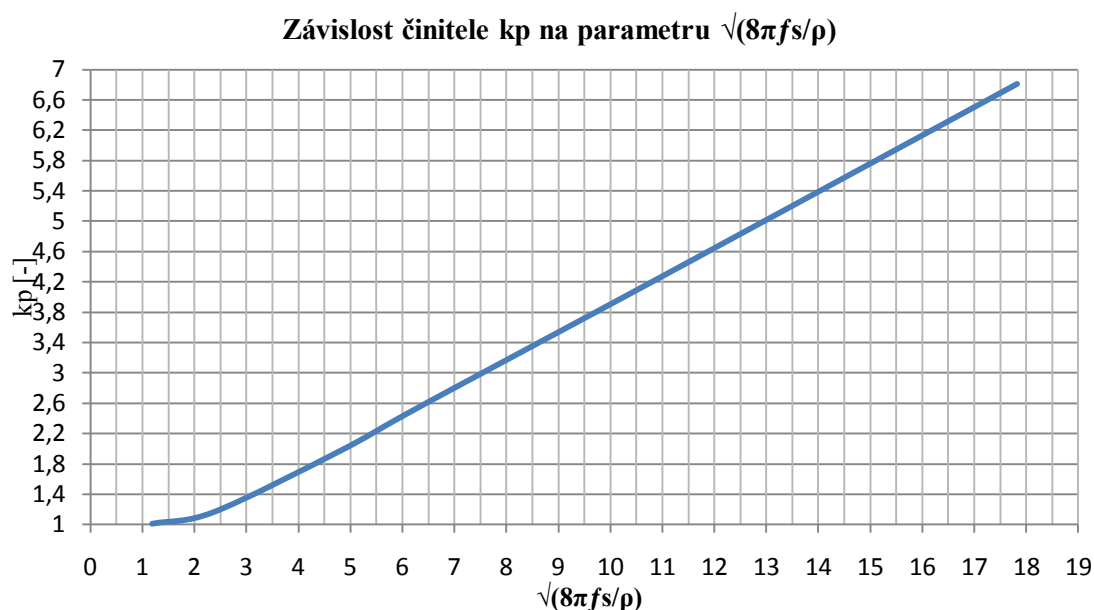
Samostatný obdélníkový vodič v poměru stran h:b - (2:1)									
b	cm	2	4	8	10	12	16	20	30
h	cm	1	2	4	5	6	8	10	15
δ	m	9,50E-03	9,50E-03	9,50E-03	9,50E-03	9,50E-03	9,50E-03	9,50E-03	9,50E-03
P_{DC}	W	89	22,25	5,5625	3,56	2,47222	1,39062	0,89	0,30555
P_{AC}	W	90,139	25,9707	10,8738	8,57	7,04594	5,177721	4,09543	2,69375
k_p	-	1,012798	1,167222	1,954832	2,407318	2,850045	3,722939	4,601609	6,810064
s	cm²	2	8	32	50	72	128	200	450
$\sqrt{(8\pi fs/\rho)}$	Ωcm	0,37566	0,75132	1,50265	1,87832	2,25398	3,00531	3,75664	5,63496

b	[cm]	volitelný parametr šířky vodiče
h	[cm]	volitelný parametr výšky vodiče
s	[cm ²]	Vypočtený parametr plochy vodiče dle vzorce $s = b \cdot h$
δ	[m]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (26)
P_{DC}	[W]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (23)
P_{AC}	[W]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (22)
$\sqrt{(8\pi fs/\rho)}$	[Ωcm]	přepočtený parametr (v soustavě CGSM - $1\Omega=10^9$ CGSM)
k_p	[-]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (22)

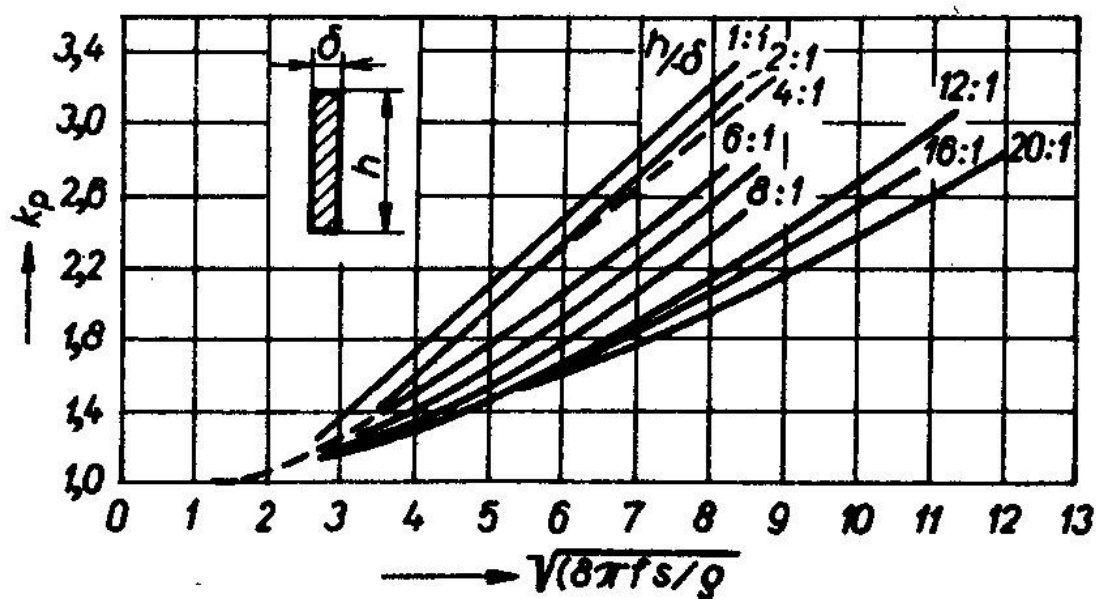
3.2.3.2. Popis případu

Z Tabulky číslo 2. jsem vytvořil graf, v němž je znázorněna závislost změny velikosti stran při zachování poměru stran (2:1) na parametru $\sqrt{(8\pi fs/\rho)}$ u něhož je uvažována hustota materiálu z kterého je vodič namodelován v [$\Omega\cdot\text{cm}$], plocha obdélníkového vodiče v [cm^2] a frekvence 50Hz procházejícího proudu o velikosti 1kA. Graf je upraven tak aby bylo možné jednotlivé hodnoty s průběhu porovnat s grafem nalezeným v literatuře [3] se stejnými požadavky na prostředí a vodič jaké jsem simuloval v programu ANSYS.

3.2.3.3. Průběhy pro obdélníkový vodič



Graf 3.2.3.3.1. Vynesený průběh závislosti změny velikosti stran obdélníkového vodiče při zachování poměru stran (h:b) 2:1, činitele povrchového jevu na parametru $\sqrt{(8\pi fs/\rho)}$



Obr. 3.2.3.3.2. Závislost činitele povrchové jevu na parametru $\sqrt{(8\pi fs/\rho)}$ pro vodiče obdélníkového průřezu při různých poměrech výšky a šířky vodiče.
(Poměrný odpor se uvádí v soustavě CGSM - $1\Omega=10^9$ CGSM) [3]

Zhodnocení:

Z namodelovaného případu dle předlohy v literatuře ([3]) jsem vynesl průběh viz graf 3.2.3.3.1. z tabulky vypočtených hodnot viz tab. 3.3. V porovnání mého viz graf 3.2.3.3.1., s grafem který jsem našel v literatuře viz obr. 3.2.3.3.2. [3], jsem dospěl k závěru, že vypočtená křivka závislosti viz graf 3.2.3.3.1., je téměř shodná s křivkou v literatuře viz obr. 3.2.3.3.2. [3]. Porovnání jsem provedl vyčtením souřadnic 10 bodů ležících na křivce viz obr. 3.2.3.3.2. [3], a následujícím porovnáním stejných 10 bodů a jejich souřadnic na vypočtené křivce viz graf 3.2.3.3.1.

3.3. Dva obdélníkové vodiče

3.3.1. Popis simulovaného případu pro dva obdélníkové vodiče

Pomocí programu jsem nasimuloval případ, ve kterém uvažujeme uložení dvou obdélníkových vodičů ve vzduchovém prostředí. Obdélníkové vodiče jsou složeny z parametrů výšky vodiče h a šířky vodiče b , oba vodiče mají stejné rozměrové parametry a jsou od sebe vzájemně vzdáleny na vzdálenost přivrácenými stranami. Mezera a mezi vzájemnými přivrácenými stranami obdélníkových vodičů je vyplněna vzduchovým prostředím. Vodiče jsou namodelovány ze stejného materiálu a to mědi. Pro tento případ jsem uvažoval případ, který bude oddalovat vzdálenost a vzájemných stran obdélníkových vodičů od sebe, po určitých vzdálenostech. To vše za předpokladu neměnných rozměrových parametrů vodičů b a h .

3.3.2. Tabulky nasimulovaných hodnot

Tab.3.4a Hodnoty pro případ s dvěma obdélníkovými vodiči, tři případy změny parametrů h a b (neměnné velikost parametrů $b=2,5\text{cm}$ a $h=8\text{cm}$)

Dva obdélníkové vodiče při změně jejich vzájemné vzdálenosti (neměnné velikost parametrů $b=2,5\text{cm}$ a $h=8\text{cm}$)								
PDC	W	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
PAC	W	18,70171	15,86388	14,50673	14,0049	13,77624	13,6549	13,58329
kP	-	2,101316	1,782458	1,629969	1,573585	1,547892	1,534259	1,526212
a	cm	1	5	10	15	20	25	30
PDC	W	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	
PAC	W	13,53763	13,50678	13,48481	13,46902	13,42964	13,41516	
kP	-	1,521082	1,517616	1,515166	1,513373	1,508948	1,507321	
a	cm	35	40	45	50	75	100	

Tab. 3.4b Hodnoty pro případ s dvěma obdélníkovými vodiči, tři případy změny parametrů h a b (neměnné velikost parametrů $b=5\text{cm}$ a $h=10\text{cm}$)

Dva obdélníkové vodiče při změně jejich vzájemné vzdálenosti (neměnné velikost parametrů $b=5\text{cm}$ a $h=10\text{cm}$)								
PDC	W	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56
PAC	W	11,79917	10,50734	9,640845	9,227045	9,009676	8,88374	8,80485
kP	-	3,314375	2,951501	2,708103	2,591867	2,530808	2,495433	2,473275
a	cm	1	5	10	15	20	25	30
PDC	W	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	3,56	
PAC	W	8,752331	8,715659	8,689055	8,6691	8,618011	8,598147	
kP	-	2,46852	2,448219	2,440746	2,4351	2,420789	2,41521	
a	cm	35	40	45	50	75	100	

Tab. 3.4c Hodnoty pro případ s dvěma obdélníkovými vodiči, tři případy změny parametrů h a b (neměnné velikost parametrů $b=10\text{cm}$ a $h=20\text{cm}$)

Dva obdélníkové vodiče při změně jejich vzájemné vzdálenosti (neměnné velikost parametrů $b=10\text{cm}$ a $h=20\text{cm}$)								
PDC	W	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
PAC	W	5,820873	5,454635	5,100681	4,84363	4,663608	4,537395	4,447238
kP	-	6,540307	6,128803	5,731102	5,442281	5,240009	5,098197	4,996897
a	cm	1	5	10	15	20	25	30
PDC	W	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	
PAC	W	4,381299	4,331918	4,294132	4,26464	4,183384	4,149237	
kP	-	4,922808	4,867326	4,824868	4,79173	4,700431	4,662064	
a	cm	35	40	45	50	75	100	

a	[cm]	volitelný parametr vzdálenosti mezi vodiči
δ	[m]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (26)
P_{DC}	[W]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (23)
P_{AC}	[W]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (22)
k_p	[-]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (22)

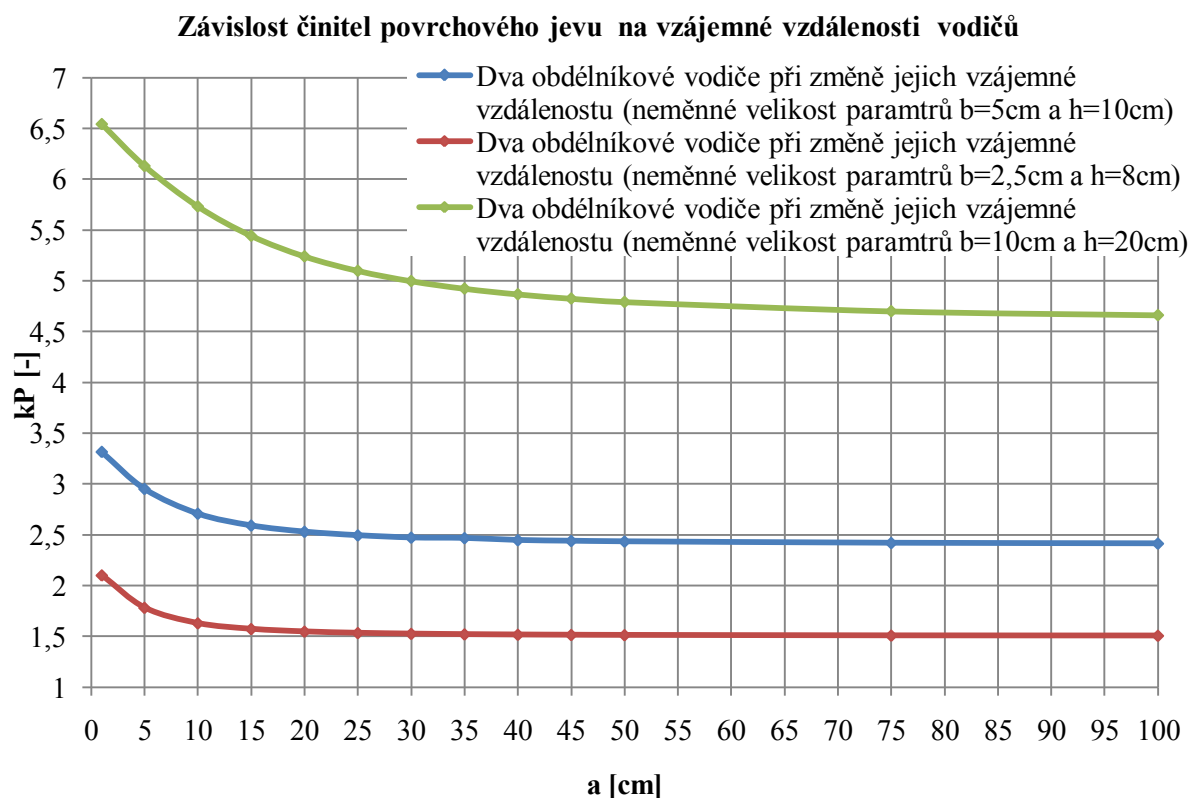
Pro můj případ simulace dvou obdélníkových vodičů uložených ve vzduchové atmosféře, jsem zvolil nezávisle zvolil tři případy pro rozměry stran obdélníkových vodičů :

- neměnné velikost parametrů $b=10\text{cm}$ a $h=20\text{cm}$
- neměnné velikost parametrů $b=2,5\text{cm}$ a $h=8\text{cm}$
- neměnné velikost parametrů $b=5\text{cm}$ a $h=10\text{cm}$

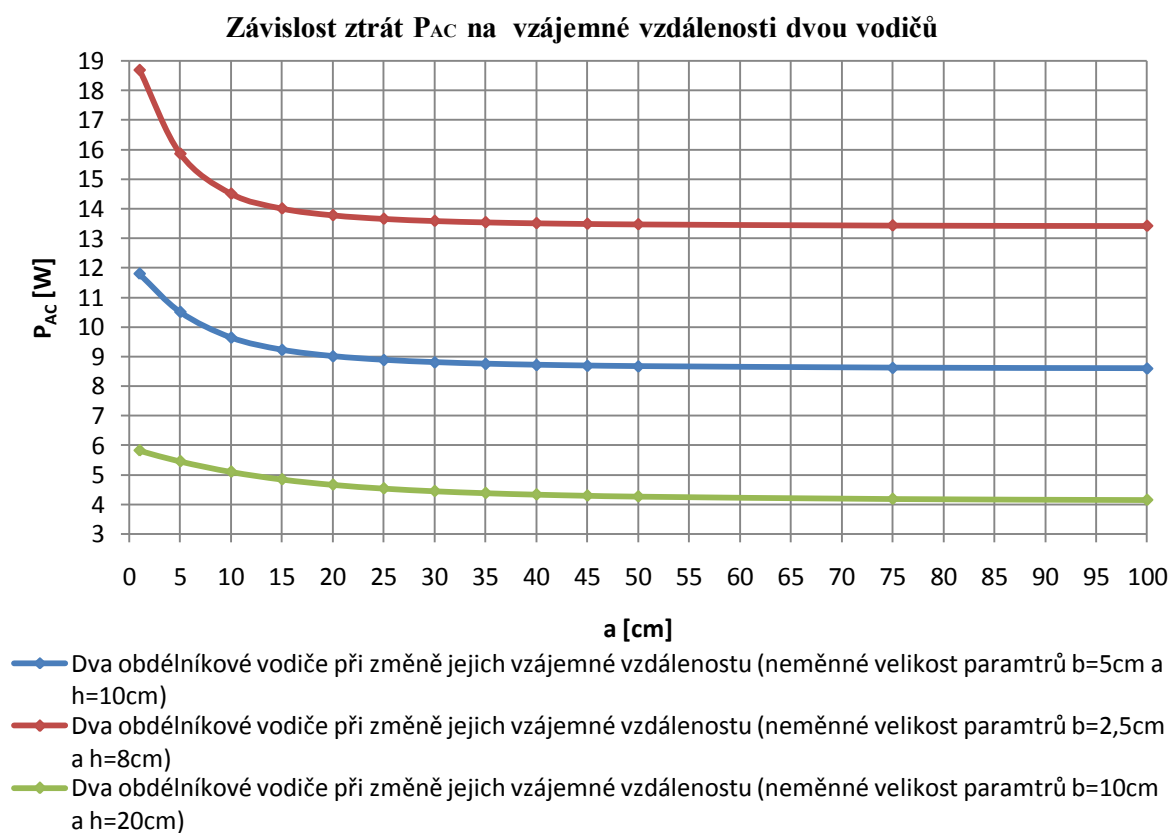
Oba vodiče mají stejné rozměrové parametry. Pro tyto parametry vodičů, které se neměnily, jsem měnil dle uvážení pouze hodnotu jejich vzájemné vzdálenosti přivrácených stran vodičů. Hodnoty, které jsem získal nasimulováním v programu ANSYS jsem zapsal do Tabulky viz Tab. 3.4., a posléze z ní vynesl závislosti.

3.3.3. Průběhy

Se zvětšující se vzájemnou vzdáleností a dvou obdélníkových vodičů se bude činitel povrchového jevu zmenšovat. Tento případ je zřejmý u všech tří namodelovaných případů neměnných velikostí parametru obdélníkového vodiče b a h viz graf 3.3.3.1. Největší pokles činitele povrchového jevu, z namodelovaných případů, je pro hodnoty velikostí parametrů vodiče $b=10\text{cm}$ a $h=20\text{cm}$. Z průběhu viz graf 3.3.3.1. je zřejmé, že čím větší budou rozměry vodičů b a h , tím bude razantnější pokles činitele povrchového jevu, který se bude měnit se vzájemnou vzdáleností přivrácených stran vodičů.

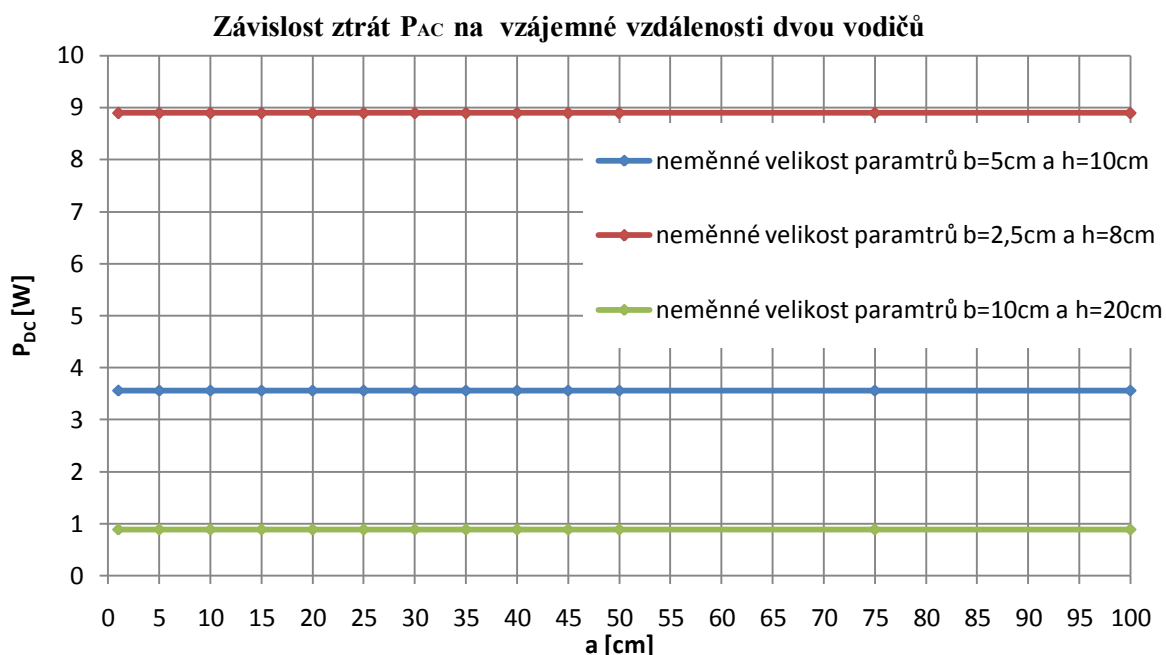


Graf 3.3.3.1. Závislost činitele povrchového jevu na vzájemné vzdálenosti stran dvou obdélníkových vodičů dle namodelovaného případu pro uložení ve vzduchové atmosféře



Graf 3.3.3.2. Závislost ztrát při průchodu střídavého proudu vodiči na vzdálenosti mezi vodiči

Z průběhu viz graf 3.3.3.2. je patrné, že čím větší bude obsah obdélníkových vodičů tím větší bude pokles ztrát při průchodu střídavého proudu vodiči v závislosti na vzdálenosti mezi přivrácenými stranami vodičů.

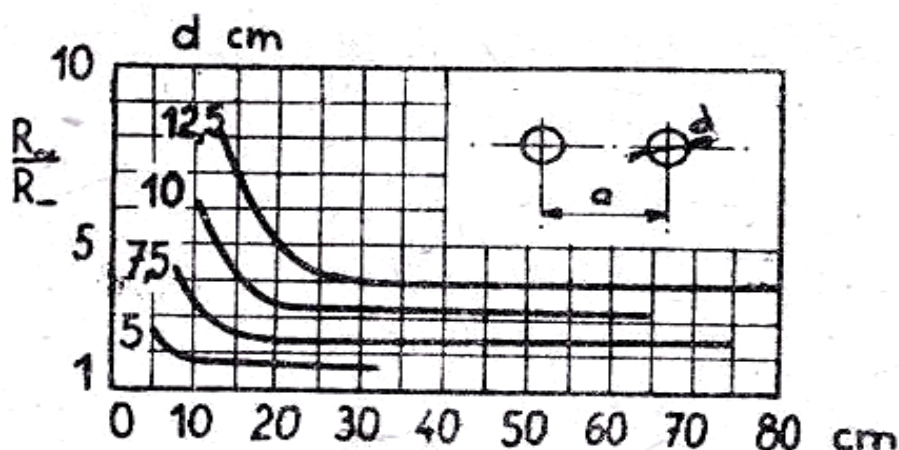


Graf 3.3.3.3. Závislost ztrát při průchodu stejnosměrného proudu vodiči na vzdálenosti mezi vodiči

Ztráty způsobné průchodem stejnosměrného proudu vodiči se budou konstantně držet na dané hodnotě nezávisle na vzájemné vzdálenosti mezi přivrácenými stranami vodičů viz graf 3.3.3.3.. Hodnoty konstantních ztrát způsobené průchodem stejnosměrného proudu obdélníkovými vodiči jsou uvedeny v předchozí Tabulce viz tab. 3.4

3.4. Dva kruhové vodiče

V simulačním programu jsem namodeloval případ, který je uvedený na obrázku č.9. Případ uvažuje dva vodiče kruhového průřezu, oba vodiče jsou uloženy ve vzduchové atmosféře. Materiál, ze kterého jsou vodiče namodelovány je měď. Oba vodiče mají stejné průměry d a jsou od sebe okraji vzájemně vzdáleny na vzdálenost a . Z důvodu lepší možnosti porovnání nasimulovaného případu s průběhy z literatury opětovně vkládám viz obr 2.2.5.[2].



Obr. 2.2.5. Údaje o plných vodičích kruhového průřezu vzdálených od sebe na délku a o stejných průměrech vodičů d [2]

Tab 3.5. Hodnoty pro případ vodičů kruhového průřezu d vzájemně vzdálených na vzdálenost a

d	cm	12,5	10	10	5
a	cm	20	15	50	5
δ	m	1,66E-04	1,66E-04	1,66E-04	1,66E-04
PDC	W	1,45047	2,266366	2,266366	9,06545
PAC	W	5,47849	6,997149	6,654	15,4511
k_d	-	3,777	3,08738	2,936	1,70439

d	[m]	volitelný parametr průměru obou vodičů
a	[m]	volitelný parametr vzájemné vzdálenosti vodičů
δ	[m]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (26)
P_{DC}	[W]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (23)
P_{AC}	[W]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu (22)
k_d	[-]	nasimulováno ve výpočetním programu dle vztahu

Zhodnocení:

Hodnoty vypočtené simulačním programem jsou nižší řádově o desetiny než hodnoty z obr. 2.2.5. Tyto rozdíly mezi hodnotami nalezených v literatuře [1] a vypočtenými hodnotami v simulačním programu ANSYS jsou způsobeny použitou přesnější metodou výpočtu, dále také odečítáním hodnot z obr. 2.2.5., kde je vyobrazen případ dvou kruhových vodičů závislosti na vzájemné vzdálenosti. Byla použita metoda simulování pomocí konečných prvků, pomocí programu ANSYS.

4. Popis řešení metodou konečných prvků – software ANSYS

Základní princip řešení pomocí metody konečných prvků v sw. ANSYS se realizuje třemi základními kroky. Tyto kroky se dále dělí na:

1. Preprocessing
 - a. Tvorba základního geometrického uspořádání modelu, rozměrové vazby (vytváření bodů, linek, ploch, objemů)
 - b. Dle typu modelu (2D nebo 3D) se přiřazují typy elementu pro řešení daného fyzikálního pole (strukturální, elektromagnetické, tepelné a pod)
 - c. Jednotlivým geometrickým tvarům se přiřadí materiálové parametry podle jejich obsahu v reálném systému
 - d. Geometrický model je pokryt výpočetní sítí (meshing)
 - e. Aplikují se zatížení (proud ve vodičích, přípojnících, proudová hustota v cívce atd.)
 - f. Aplikují se okrajové podmínky (podmínky paralelního toku, podmínka kolmého toku, podmínky na řezech oblastí apod.)
2. Solution
 - a. Volba typu analýzy (statická, harmonická, transientní)
 - b. Nastavení časů řešení, kroků, iterací a konvergenčních kritérií
 - c. Nastavení ukládání výsledků a zobrazovaných fyzikálních veličin
 - d. Vlastní řešení modelu (podle velikosti a složitosti modelu od jednotek sekund do několika dní)
3. Postprocessing
 - a. Načtení výsledků řešeného modelu (načtení kroků či časových úseků řešení)
 - b. Zobrazení výsledků na uzlech a elementech výpočetní sítě modelu (magnetická indukce, intenzita mag. pole, proudová hustota, elektrický potenciál apod.)
 - c. Zobrazení výsledků pomocí vektorového zobrazení (proudová hustota, magnetická indukce, intenzita mag. pole)
 - d. Výpočet magnetického toku, ztrát, silových účinků (probíhá pomocí základních fyzikálních interakcí řešeného pole)
 - e. Zobrazení veličin na zvolených drahách, grafické závislosti sledovaných veličin
 - f. Vytváření animací dle kroků řešení či časově závislých změn sledovaných veličin

Celý výše uvedený proces je možno automatizovat vytvořením maker, která se následně spouští podle potřeby. Základním programovacím jazykem je tzv. APDL, pomocí kterého lze formou jednoduchých příkazů s parametry postupně vytvořit celé řešení modelu.

V příloze na přiloženém médiu CD nebo DVD jsou k nahlédnutí finální makra a makro pro řešení pro řešení vlivu povrchového jevu při napájení vodiče kruhového průřezu střídavým proudem. Vliv skinefektu je určován pomocí podílů střídavých a stejnosměrných ztrát, které vznikají průchodem proudu ve vodiči.

5. Závěr

Na předních stránkách mé práce jsou teoreticky popsány základní popisky problematiky jevů vznikajících ve vodičích, za předpokladu protéká-li jimi proud. Jsou to základní jevy, jakými jsou například: povrchový jev, jev blízkosti, rozložení proudu, výpočet odporu. Dále je uveden stručný popis přípojníc, přípojniových systémů a příkladech parametrů uvedených údajů v katalogových listech. Příklady výběru katalogových listů přikládám na CD pro konkrétnější přehled.

Jako svůj modelovací software jsem zvolil program Ansys. Pro popis numerického modelu (výpočtu), jsem použil metodu modelování konečných prvků, která je dnes považována za jednu z předních metod pro výpočet fyzikálních polí. Hlavní předností metody a modelovacího softwaru, kterou jsem v neposlední řadě využil, je grafická interpretace modelovaného objektu nebo její části.

Modelování a výpočty jsem realizoval pro dva typy vodičů, kruhového průřezu a obdélníkového průřezu, jak v osamoceném stavu, tak i za předpokladu uložení dvou vodičů stejného typu a rozměrů ve stejné rovině na stejné ose. Všechny tyto případy jsou modelovány ve vzduchovém prostředí.

Pro případy osamocených vodičů jsem vyhodnocoval, jak se mění rozložení proudu (činitel povrchového jevu) ve vodiči při změně rozměrů. Z mého modelovaného případu je zřejmé, že činitel povrchového jevu se bude zvětšovat se zvětšením obsahu vodiče, což má za následek vytlačení proudových vláken a přenos proudu směrem k povrchu vodiče. Na namodelovaných případech jsem ověřil funkčnost a rozsah teorie. Dále jsem sledoval i změny velikosti ztrát při průchodu střídavého i stejnosměrného proudu taktéž při změně rozměrů vodiče. Zjistil jsem, že ztráty způsobené průchodem jak střídavého tak i stejnosměrného proudu vodičem se budou se zvětšujícím obsahem velikostně zmenšovat. Pro obdélníkový i kruhový průřez vodiče jsem vložil obrázek, pro názorné rozložení proudu ve vodičích daných průřezů.

Pro kruhový i obdélníkový vodič jsem našel v literaturách případy nebo příklady, jenž jsou prováděny na přípojnících nebo samostatných vodičích, vybrané případy jsem nasimuloval, za předpokladu dodržení stejných vstupních parametrů a stejných okolních podmínek a porovnával jsem hodnoty nasimulované hodnoty s hodnotami již dříve vypočtenými.

V případě kruhového samostatného vodiče jsem našel příklad pro analytický výpočet z poměru ztrát při průchodu střídavého i stejnosměrného proudu vodičem činitele povrchového jevu pro průměr vodiče 30mm. Výsledek příkladu pro činitel povrchového jevu je 1,12, z nasimulovaného případu činitel povrchového jevu vyšel $1,1176 \approx 1,12$. Výsledky jsou téměř stejné, odchylka je způsobena především přesnější metodou výpočtu a nepřesností odečítáním z grafů.

V literatuře jsem našel průběh pro případ samostatného obdélníkového vodiče (přípojnici) závislosti činitele povrchového jevu pro přípojnici s daným poměrem stran h:b. Zvolil jsem případ, kdy obdélníkový vodič bude mít poměr stran h:b - 2:1 navolil jsem řadu hodnot rozměrů tak aby splňovala daný poměr, z hodnot jsem vynesl průběh a porovnal je. Porovnání jsem realizoval vybráním 10 bodů z průběhu v literatuře a 10 bodů o stejných souřadnicích z vneseného průběhu z vypočtených hodnot. Zjistil jsem, že hodnoty i vnesený průběh je téměř stejný. Malé odchylky jsou způsobeny přesnější metodou výpočtu a chybami při odečítáním z průběhů.

Pro případ uložení dvou obdélníkových vodičů jsem zvolil případ uložení ve stejné rovině a pozorování změny činitele povrchového jevu v závislosti na změně vzájemné vzdálenosti těchto vodičů o stejných vlastnostech, typech a rozměrech. Dle svého uvážení jsem zvolil tři případy pro obdélníkové vodiče a různé rozměry (vždy stejné rozměry pro oba vodiče pro danou simulaci). Z výsledných průběhů je zřejmé, že činitel povrchového jevu bude se zvětšující se vzájemnou vzdáleností vodičů zmenšovat (exponenciálně klesat) až do dané hodnoty kdy se činitel povrchového jevu ustálí na konstantní hodnotě. Ztráty způsobené průchodem střídavého proudu budou se zvyšující se vzájemnou vzdáleností zmenšovat. Pro ztráty způsobené průchodem stejnosměrného proudu bude platit, že se hodnota těchto ztrát se nebude měnit se zvětšující se vzájemnou vzdáleností, tyto ztráty jsou stejné jako u samostatného obdélníkového vodiče stejných rozměrů.

Pro dva vodiče uložené ve stejné rovině jsem zvolil jako způsob porovnání, vypočtením pěti hodnot a jejich porovnání se souřadnicemi z průběhu nalezeného v literatuře. Hodnoty se od sebe řádově liší o desetiny hodnoty, tyto odchylky přikládám chybě způsobené při odečtu z grafu a v neposlední řadě i přesnější numerickou výpočetní metodu a to metodu konečných prvků.

Makra pro výpočet v programu Ansys, vybrané obrázky rozložení proudu, tabulky naměřených hodnot v programu Excel a příklady katalogových listů jsou přiloženy na CD nosiči.

Pro porovnání jsem volil jen tyto nejjednodušší případy, abych mohl demonstrovat jednoduché principy průběhů ve vodičích. Dále je možné modifikovat případy modelování a to změnou nebo přidáním různých tvarů, typů vodičů, přípojníc a případů propojení uložení a jiné. Zkoumání těchto modelů lze rozšířit především o počet vodičů a také vynášením průběhů a závislostí jiných hodnot a vlastností dle libosti. Hranice klade jen omezení simulovaného softwaru, je ale nezbytné opomenout, že možnosti mnou použitého softwaru Ansys a metody konečných prvků jsou velmi široké.

Další návazností aplikace modelování popsaného v mé práci a popisů problematiky rozložení proudu ve vodičích a přípojnících lze využít nejen u vodičů, přípojníc, soustav vodičů, rozveden, ale i u přístrojů, strojů a jiných případů, kde je potřeba brát zřetel na rozložení proudů ve vodivých materiálech.

6. Seznam použité literatury

- [1] Tepelný výpočet elektrických přístrojů – Ing. Otto ARTBAUER (1963 SVTL Bratislava, 1.vydání, náklad100, SVŠT Bratislava)
- [2] Elektrické přístroje – Otto HAVELKA (Praha , 1985, SNTL)
- [3] Elektrické přístroje – Buř B.K. (SNTL Praha 1977)
- [4] <http://www.ansys.com/>
- [5] <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2004120201>
(17. listopadu 2011 20:14)
- [6] <http://www.radartutorial.eu/03.linetheory/tl07.en.html>
- [7] [http://www.siemens.cz/siemjetstorage/files/47694_TIA\\$071105\\$071108\\$Sivacon\\$8PS.pdf](http://www.siemens.cz/siemjetstorage/files/47694_TIA$071105$071108$Sivacon$8PS.pdf)
(26. února 2011 17:44)
- [8] <http://www.schneider-electric.cz/>
- [9] <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2004120201>
- [10] <http://www.odbornecasopisy.cz/download/elektro/2007/el070718.pdf>
(28.února 2011 17:40)
- [11] <http://www.impeder.com/Efficiency/frame45304.html>
- [12] <http://www.svsfem.cz/content/produkty-firmy-ansys-inc>